

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Výpočet zkratových poměrů v průmyslovém podniku pro
různá zapojení**
**Calculation of Short Circuit Conditions in Industrial
Company for Various Connections**

2012

Petr Moravec

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Moravec**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: Výpočet zkratových poměrů v průmyslovém podniku pro různá zapojení
Calculation of Short Circuit Conditions in Industrial Company for
Various Connections

Zásady pro vypracování:

1. Problematika napájení průmyslových objektů
2. Teorie výpočtů zkratových poměrů
3. Popis provozního zapojení sítě průmyslového podniku
4. Výpočet zkratových poměrů na zadaných rozvodnách
5. Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Trojánek Z., Hájek J., Kvasnica P.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách, SNTL, Praha, 1987
2. Hradílek Z.: Elektroenergetika I a II. Skripta VŠB-TUO, Ostrava, 1992 a 1993
3. Normy ČSN
4. Další literatura podle pokynů vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

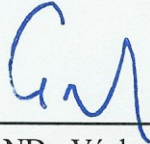
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 04.05.2012

Podpis Petr Moravec

Poděkování

Děkuji panu doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. a Ing. Marku Tinkovi, Ph.D. za cenné rady, podněty a připomínky při zpracování diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá výpočtem zkratových poměrů v rozvodné síti vn průmyslového podniku. Součástí práce je teoretická část ve které je rozebrána problematika napájení průmyslových podniků a teorie výpočtů zkratových poměrů. V praktické části práce je uveden popis provozního zapojení sítě průmyslového podniku a výpočet maximálních a minimálních zkratových poměrů pro několik možných provozních zapojení sítě. V závěrečné kapitole je provedena kontrola na dovolené oteplení při zkratu.

Klíčová slova

Zkrat, zkratový proud, zkratový výkon, zkratové impedance, rozvodna, transformátor, přípojnice, motor, generátor, reaktor

Abstract

This master work resolves the computations of a short circuit ratio in a supply network of the high voltage in an industrial company. The one part of this work is a theoretical part in which is analyzed the problem of supplying of industrial companies and the theory of computing of a short circuit ratio. In the practical part it is shown the description of operating make of a supply network and the computations of maxima and minima of a short circuit ratio for several possible operating make of a supply network. In the final chapter is done a control of a safe temperature rise during a short.

Key words

Short-circuit, short-circuit current, short-circuit power, short-circuit impedances, substation, transformer, busbar, motor, generator, rector

Seznam použitých symbolů a zkratk

HDO	hromadné dálkové ovládání	
I_k''	počáteční souměrný rázový zkratový proud	[kA]
I_{th}	ekvivalentní oteplovací zkratový proud	[kA]
S_k''	zkratový výkon soustavy	[MVA]
S_{k3}''	počáteční souměrný rázový zkratový výkon	[MVA]
UPS	zdroj nepřerušovaného napájení	
U_n	jmenovité napětí v místě zkratu	[V]
$Z_{(1)}$	sousledná impedance zkratového obvodu	[Ω]
$Z_{(2)}$	zpětná impedance zkratového obvodu	[Ω]
$Z_{(0)}$	netočivá impedance zkratového obvodu	[Ω]
c	napěťový součinitel	
i_p	nárazový zkratový proud	[kA]
nn	nízké napětí	
vn	vysoké napětí	
vvn	velmi vysoké napětí	
zvn	zvlášť vysoké napětí	

Další použité symboly a zkratky jsou vysvětleny přímo v textu diplomové práce.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Problematika napájení průmyslových objektů	2
2.1 Provozní spolehlivost.....	2
2.2 Napěťové úrovně v ES.....	3
2.3 Principiální řešení z hlediska uspořádání.....	3
2.4 Druhy elektrických stanic	4
2.4.1 Dělení elektrických stanic	5
2.4.2 Zařízení elektrických stanic.....	6
2.4.3 Střídavé elektrické rozvodné zařízení	6
2.5 Přípojnicové systémy	7
2.5.1 Vodiče přípojníc.....	7
2.5.2 Jednoduchý systém přípojníc	7
2.5.3 Dvojitý systém přípojníc	9
2.5.4 Trojitý systém přípojníc	10
2.6 Průmyslový rozvod elektrické energie	10
2.6.1 Náhradní zdroje	11
2.6.2 Vedení v průmyslovém podniku	11
3. Teorie výpočtu zkratových poměrů	13
3.1 Zkratý.....	13
3.2 Charakteristiky zkratových proudů	13
3.3 Předpoklady výpočtu	14
3.4 Maximální zkratové proudy	15
3.5 Minimální zkratové proudy.....	15
3.6 Metoda výpočtu.....	15
3.5 Zkratové impedance elektrických zařízení	16
3.6 Výpočet zkratových proudů	19
4. Popis provozního zapojení sítě průmyslového podniku	21
5. Výpočet zkratových poměrů na zadaných rozvodnách.....	23
5.1 Výpočet zkratových impedancí zařízení nacházející se v průmyslovém podniku.	23
5.2 Varianta 1.MIN.....	26
5.2 Varianta 1.MAX	29
5.3 Varianta 2. MAX	33
5.4 Varianta 3.MAX	38
5.5 Varianta 4.MAX	43
5.6 Varianta 5a.MAX	48
5.7 Varianta 5b.MAX	53
5.8 Varianta 6. MAX	58
5.9 Varianta 7a. MAX	64
5.10 Varianta 7b.MAX	69
6. Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu.....	74
7. Vyhodnocení výsledků.....	76
7.1 Varianta (1.MIN).....	76
7.2 Varianta (1.MAX)	77
7.3 Varianta 2.	78
7.4 Varianta 3.	79
7.5 Varianta 4.	80

7.6 Varianta 5a.	81
7.7 Varianta 5b.	82
7.8 Varianta 6.	83
7.9 Varianta 7a.	84
7.10 Varianta 7b.	85
8. Závěr.....	86
Literatura	87

1. Úvod

Zkrat je náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule. Při zkratu prochází místem zkratu mnohonásobně větší proud, než je proud jmenovitý. Zkraty se vyznačují tepelnými a silovými účinky na které musíme zařízení dimenzovat.

V úvodní kapitole je teoreticky rozebrána problematika napájení průmyslových objektů. Jako provozní spolehlivost, napěťové úrovně v ES, přípojnícové systémy a průmyslový rozvod. Další kapitola pojednává o teoretickém základu nutném pro výpočet zkratových poměrů. Uvedeny jsou závazné předpoklady pro výpočet zkratových poměrů, metody výpočtu a vzorce pro výpočet zkratových impedancí elektrických zařízení podle normy ČSN EN 60909-0.

Ve čtvrté kapitole je proveden podrobný popis provozního zapojení sítě průmyslového podniku, napájení průmyslového podniku a všech připojených elektrických zařízení na hladině 10 kV které byly zahrnuty do výpočtu na hlavních a podružných rozvodnách.

Následující kapitola se již zabývá samotným výpočtem zkratových poměrů podle sedmi variant zapojení. Výpočet maximálních zkratových poměrů je nutno provést z důvodů dimenzování zařízení. Zkratové proudy musí být ochranami vypnuty dříve než dojde k poškození zařízení. Výpočet maximálních zkratových poměrů byl proveden pro sedm variant zapojení, přičemž varianty 5 a 7 mají dále podvarianty a, b. U první varianty byly vypočteny minimální zkratové poměry z důvodů, že se jedná se o nejméně příznivou variantu z hlediska nastavení ochran. Vypočteny byly celkové náhradní impedance a poté počáteční souměrné rázové zkratové proudy a zkratové výkony.

V závěrečné kapitole byla provedena kontrola kabelů na dovolené oteplení a byla vypočítána maximální doba trvání zkratu pro všechny použité kabely v průmyslovém podniku.

2. Problematika napájení průmyslových objektů

2.1 Provozní spolehlivost

Pod pojmem provozní spolehlivost silnoproudého elektrického zařízení rozumíme schopnost určeného zařízení přenést a předat elektrickou energii v potřebném množství a kvalitě na dané místo a v daném čase. Tomuto požadavku je nutné přizpůsobit provedení elektrického silnoproudého rozvodu a přístrojového vybavení. Pro některé případy je nutné zvláštní provedení rozvodu s ohledem na dodávku energie důležitým spotřebičům i záložním nezávislým zdrojům elektrické energie. Rozeznáváme tři druhy stupně důležitosti spotřeby.

Spotřeba 1. stupně důležitosti

Mezi spotřebiče 1. stupně důležitosti patří zejména spotřebiče nebo skupiny spotřebičů u kterých by v případě výpadku napájení mohlo nastat ohrožení zdraví nebo dokonce života nebo u takových spotřebičů u kterých by při výpadku došlo k velkým ekonomickým ztrátám, například narušení nebo zničení technologického procesu. Pro takovéto spotřebiče je nezbytné zajištění rezervního zdroje, nezávislého na pracovním zdroji. Mezi nezávislé zdroje řadíme druhý silový transformátor napájený dalším vedením z nadřazené elektrizační soustavy (vvn). Příkladem spotřebičů 1. stupně důležitosti je například nemocnice s nepřetržitým provozem, tavicí pec, důlní zařízení nebo zařízení na zpracování dat.

Spotřeba 2. stupně důležitosti

U spotřebičů druhého stupně není tak zásadní nepřetržitost dodávky elektrické energie. Při výpadku nedochází k ohrožení života či zdraví a k větším ekonomickým škodám v důsledku vážného poškození zařízení. Výpadek napájení se projeví zastavením výroby. U těchto spotřebičů je třeba dodávku elektrické energie pokud možno zajistit ale nevyžadují se zvláštní zařízení nebo náhradní napájení. Mezi takovéto spotřebiče patří například obráběcí stroje, různé průmyslové provozy.

Spotřeba 3. stupně důležitosti

Mezi tyto spotřebiče patří všechny ostatní spotřeby a odběry, u kterých není nutná dodávka elektrické energie zajišťována zvláštními opatřeními. Do toho stupně důležitosti patří například domácnosti, školy, úřady.

V průmyslových závodech je běžně více zařízení o různých stupních důležitosti. Záskokový nebo náhradní zdroj se pak dimenzuje pouze na pokrytí spotřebičů prvního stupně důležitosti a tomu musí odpovídat návrh rozvodného zařízení. [1]

2.2 Napět'ové úrovně v ES

Elektrická energie se přenáší venkovními vedeními nebo kabely na různou vzdálenost s rozdílnou velikostí přenášeného výkonu. Vzdálenost přenosu a velikost přenášeného výkonu určují pak předpokládané provozní parametry a velikost použitého napětí. Velikost přenosového napětí potom určuje rozměry a provedení elektrického vedení.

Normalizovaná stupnice udává napětí sdružená. Normalizovaná řada střídavých trojfázových napětí je uvedena v tabulce 1.2.1. Každá napět'ová úroveň má udanou jmenovitou hodnotu a provozovací hodnotu. Provozní je nejvyšší hodnota napětí, při kterém je ještě možné síť trvale provozovat.

Tabulka 1.2.1 Napět'ové úrovně v ES

Nízké napětí (nn)	jmenovité	0,4/023			0,5	0,69
[kV]	max provozovací	0,42/0241				0,73
Vysoké napětí (vn)	jmenovité	3	6	10	22	35
[kV]	max provozovací	3,6	7,2	12	25	37
Velmi vysoké napětí (vvv)	jmenovité	110		220	400	-
[kV]	max provozovací	123		245	420	-
Zvlášť vysoké napětí (zvn)	jmenovité	750				
[kV]	max provozovací	787 (předpokládané zvýšení na 800)				

Nadřazená soustava má napětí 400 kV a částečně 220 kV. Síť 220 kV se už nadále nerozvíjí (byla budována v minulosti) je pouze doplňkem 400 kV nadřazené soustavy. Většina sítí 110 kV a sítě vn a nn jsou označovány jako distribuční a jsou spravovány regionálními poskytovateli elektrické energie.

Stejnoseměrná napětí:

- Napájení malých spotřebičů: ovládání, signalizace, automatiky, nouzového osvětlení, malých motorů 12, 24, 48, 60, 110, 220, 440, 600 [V]

- Napájení dopravních prostředků: tramvají, trolejbusů, metra, vlaků, atd. (600), 700, 1500, 3000 [V]

Stejnoseměrný přenos velkých výkonů a na dlouhé vzdálenosti při 500 kV není v České republice používán. [2],[3]

2.3 Principiální řešení z hlediska uspořádání

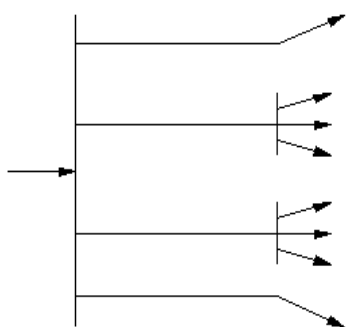
Sítě z hlediska konfigurace mohou být řešeny jedním ze dvou základních uspořádání. Jako otevřený rozvod, kde elektrická energie je dodávána ke spotřebiči pouze jednou cestou. Uzavřeným rozvodem, napájení je možné zajistit vždy nejméně ze dvou stran.

Mezi první způsob napájení patří paprskový rozvod a průběžný rozvod, k druhému způsobu rozvodu náleží okružní rozvod a mřížová síť. Výběr vhodného druhu rozvodu především záleží na způsobu provozu dané soustavy, jak z hlediska rozdělování výkonu, tak i z hlediska bezpečnosti a hospodárnosti. Na obrázcích 1 až 5 jsou naznačeny uvedené druhy rozvodů elektrické energie.

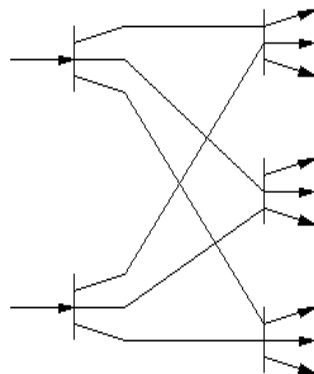
Nadřazená soustava 400 kV a 220 kV je řešena okružním rozvodem do kterého jsou připojeny tuzemské zdroje velkých výkonů.

Distribuční soustava 110 kV a vn je řešena paprskově případně průběžným rozvodem, i když toto řešení umožňuje více propojení do dvojpaprskového nebo okružního rozvodu.

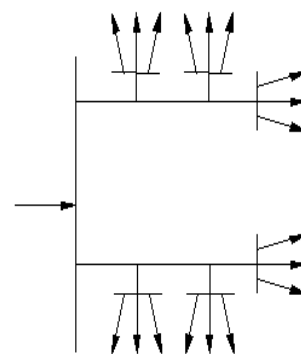
Distribuční sítě nn jsou řešeny nejčastěji paprskovým a průběžným rozvodem, husté městské jsou řešeny jako mřížové. [2]



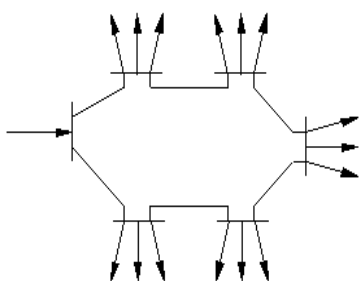
Obr. 1 Paprskový rozvod



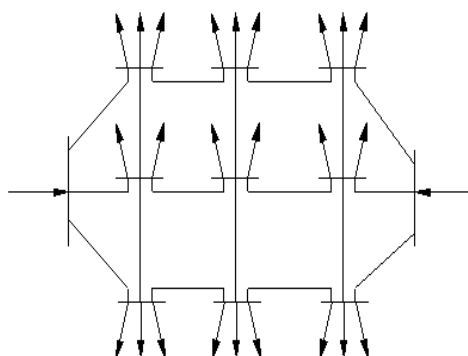
Obr. 2 Dvojpaprskový rozvod



Obr. 3 Průběžný rozvod



Obr. 4 Okružní rozvod



Obr. 5 Mřížový rozvod

2.4 Druhy elektrických stanic

Elektrizační soustava je složená z výroben (elektráren), přenosu, rozvodů a spotřebičů elektrické energie. Spojovacím prvkem mezi výrobkami a rozvodnou sítí a ve vlastní rozvodné sítí mezi sítí a spotřebiči, jsou elektrické stanice, jejichž nejdůležitějším úkolem je transformovat napětí a rozvádět elektrickou energii o různých napětích. Další funkcí elektrických stanic je přeměna střídavého napětí na stejnosměrné a naopak. Dále se elektrické stanice využívají ke sběru a předávání dat, řešení poruchových stavů.

2.4.1 Dělení elektrických stanic

Podle účelu můžeme elektrické stanice dělit na:

- **Transformovny**, které zajišťují dvě funkce: rozvádění elektrické energie a transformaci na potřebné napětí.
- **Spínací stanice**, které jsou určeny k rozvádění elektrické energie o stejném napětí.
- **Měničny**, které slouží k přeměně střídavého napětí na stejnosměrné nebo naopak a rozvádějí stejnosměrné napětí. Měničny je možno rozdělit na dva základní typy:
 - a) Elektrické stanice (měničny) přenosu, na daných úsecích je přenos realizován stejnosměrným napětím, které je potřebné pro spojení dvou soustav s různou frekvencí nebo s různým způsobem regulace frekvence (například stejnosměrné spojení přenosových soustav mezi dvěma státy).
 - b) Elektrické stanice (měničny) spotřebního charakteru, které jsou určeny k transformaci na stejnosměrné napětí pro trakci a některé průmyslové rozvody.

Podle umístění elektrické stanice ve schématu elektrizační soustavy můžeme dělit stanice na:

- **Elektrické stanice výroby**, transformovny sloužící k transformaci vyrobené energie obvykle vysokého napětí na velmi vysoké napětí přenosové soustavy. Směr toku energie je z alternátoru do sítě. Počet odboček je určen počtem bloků výroby a počtem vývodových vedení.
- **Elektrické stanice v přenosové soustavě**.
 - a) Uzlové elektrické stanice, jsou spínací stanice tvořící společný bod mezi větvemi okružní přenosové sítě a rozvádějí elektrickou energii o stejném napětí.
 - b) Transformační stanice, jsou stanice ve kterých je transformována elektrická energie soustav o různém napětí.

Obvykle jsou oba typy současně jediné elektrické stanice. Jedná se o elektrické stanice vvn nebo vvn/vn. Směr toku výkonu v odbočkách je různý je dán aktuální výrobou a spotřebou elektrické energie.

- **Elektrické stanice spotřeby**.
 - a) Distribuční elektrické stanice určené k rozdělování elektrické energie, transformaci napětí a dodávce elektrické energie ke spotřebním centřům. Obvyklé je použito napětí 22 kV (35 kV) a u menších spotřebních center je úroveň rozdělovaného napětí 6kV a 10kV
 - b) Průmyslové elektrické stanice rozdělují elektrickou energii v průmyslových podnicích ke spotřebičům a transformují dané napětí na nn. Jako transformovny 110 kV/vn, vn/vn, vn/nn, případně spínací stanice vn nebo nn. Nejčastěji používaná úroveň napětí (vn) v průmyslu je 6 kV, případně 10 kV.

Zvláštním typem elektrické průmyslové stanice jsou stanice určené pro vlastní spotřebu bloků elektrárny. Směr toku elektrické energie je vždy ze sítě směrem ke spotřebě.

2.4.2 Zařízení elektrických stanic

Převážná většina elektrických stanic se skládá ze zařízení svým významem podobná.

- Střídavé elektrické rozvodné zařízení rozvodny, rozvaděče, rozvodnice.
- Společná zařízení: zařízení pro vlastní spotřebu, část střídavá i stejnosměrná, nouzové zdroje, akumulátorová baterie, střídače, výroba plus rozvod stlačeného vzduchu, měnič frekvence, dozorna, ochrany, měření a signalizace, stroje a přístroje sloužící pro měření, revize.
- Pomocná zařízení: revizní věž, budova společných provozů, olejové hospodářství, dílny, garáže, sklady, vrátnice
- Protipožární zařízení
- Zařízení a prostředky pro ochranu zdraví a hygienu určené pro dozor stanice tak i pro externí pracovníky.
- V některých stanicích je dále instalováno: vysílače HDO, rotační kompenzátory, statické kompenzátory a kompenzační tlumivky.

2.4.3 Střídavé elektrické rozvodné zařízení

Rozvodné zařízení slouží v elektrické stanici k rozvádění elektrické energie o stejném napětí. Patří mezi ně všechny potřebné přístroje určené k rozvádění elektrické energie, seřazené a zapojené podle daného elektrického schématu.

Základní prvky rozvodného zařízení:

- **Přípojnice** jsou holé vodiče, tuhé nebo lanové, velikost jejich průřezu a profilu je dána proudovým zatížením, požadavky na pevnost a zkratovými poměry. Přípojnice jsou napájeny prostřednictvím přírodních odboček a elektrická energie je odváděna ke spotřebičům prostřednictvím vývodních odboček. Přípojnicový systém je soubor n fází přípojníc.
- **Odbočky** tvoří soubor propojených přístrojů, které jsou určeny ke spínání měření a ochraně vývodů případně přívodu elektrické energie, spínačů přípojníc, vývodů k měřicím transformátorům napětí, k bleskojistkám atd.

Základní zařízení odbočky jsou:

- **Spínač** který je určen k zapínání nebo vypínání odbočky pod zatížením nebo bez zatížení. Podle důležitosti je to vypínač, odpínač, odpojovač, stykač
- **Přípojnicový odpojovač** slouží k viditelnému odepnutí odbočky od přípojnicového systému
- **Vývodový odpojovač** slouží k viditelnému oddělení vedení, kabelového nebo venkovního od rozvodny. Většinou je vybaven zemnicími noži
- **Měřicí transformátory proudu a napětí**, jejich instalace je závislá na důležitosti odbočky a na požadavku měření a ochrany odbočky
- **Měřicí a signalizační zařízení**
- **Elektrické ochrany**

Podle konstrukčního uspořádání můžeme dělit rozvodná zařízení na:

- **Rozvodnu** zařízení, které je postaveno a zkoušeno až na místě užití a vyžaduje zvláštní stavební úpravy.

- **Rozvaděč** zařízení u něhož přístroje a nosná konstrukce tvoří jeden celek. Na místo provozu je instalován zkompleťovaný a vyzkoušený. Zvláštní stavební úpravy nejsou potřeba, pouze kabelové prostupy a kanály.

- **Rozvodnice** je zařízení nn, jako například rozvodná deska s pojistkami.

Odbočky rozvodného zařízení jsou konstrukčně uspořádány v poli nebo kopce, což jsou části prostoru venkovní rozvodny, kryté rozvodny, nebo rozvaděče, určené pro instalaci její výzbroje. Jednotlivé prostory odboček jsou odděleny mezistěnami.

2.5 Přípojnicové systémy

2.5.1 Vodiče přípojníc

Přípojnice v rozvodných zařízeních nn a vn jsou z holých plochých tyčí z elektrovedného hliníku EA1. Dále je možné použití tyče z jiného profilu jako například kruhového profilu nebo „U“ profilu atd. Přípojnice v rozvodných zařízeních vvn venkovního provedení jsou obvykle ocelohliníková lana AlFe o průřezu větším než 350 mm², nebo svazkové vodiče s rozpěrkami. Pro rozvodny vnitřního provedení jsou nejužívanější profilové vodiče. U nově budovaných venkovních rozvodů vvn se přechází na trubkové vodiče.

V případě značného proudového zatížení se používá paralelních plochých tyčí zpevněných výztužnými vložkami. V případě zařízení nn mohou mít přípojnice odstupňovaný průřez podle skutečného proudu, který jimi v jednotlivých úsecích protéká. Zmenšený průřez se pak nejistí.

Průřez a uspořádání přípojníc jako vzdálenost fází a uložení vodičů je dáno provozním stavem (zatěžovacím proudem a napětím) a poruchovým stavem (nutná je odolnost vůči tepelným a dynamickým účinkům zkratového proudu).

2.5.2 Jednoduchý systém přípojníc

Jednoduchý systém přípojníc je možné použít tam, kde není nutný nepřetržitý provoz při revizích a opravách. Používají se v rozvodných zařízeních pro napájení spotřebičů 3. kategorie důležitosti. V případě požadavku zajištění napájení se používají přípojnice dělené na podélné sekce. Podélný spínač je sepnut v případě výpadku jedné z přívodních odboček. Rozvodny které nejsou určeny pro paralelní chod zdrojů, je nutné podélný spínač přípojníc blokovat proti možnému zapnutí obou přívodních vypínačů. Pro provoz rozvodných zařízení s jednoduchým systémem přípojníc s používají následující schémata.

- Napájení z jednoho zdroje, v případě jeho poruchy není rezerva. Obr. 6

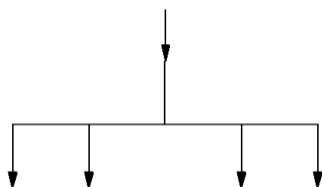
- Nedělený systém přípojníc se dvěma zdroji. V případě poruchy jednoho ze zdrojů je zajištěna okamžitá rezerva výkonu (podle daného výkonového dimenzování může být částečná nebo plná), výměna, revize, oprava zdroje je možná bez přerušení provozu. Obr. 7

- Podélně dělený systém přípojníc s odpojovačem, možné je pouze spínání bez zatížení, každá sekce je vybavena vlastním zdrojem a doba přerušení je určená dobou potřebnou k sepnutí.

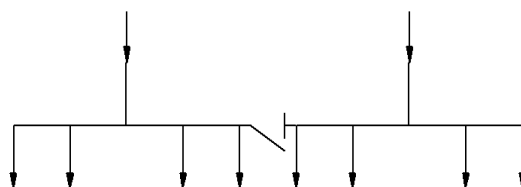
U vypnuté části zařízení je možná revize a údržba. Obr. 8

- Podélně dělený systém přípojníc s vypínačem. V případě poruchy zdroje je dále možný provoz bez přerušení. U vypnuté části zařízení je možná revize a údržba. Obr. 9

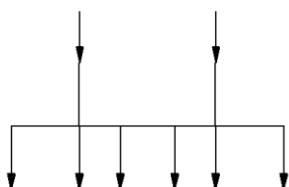
- Podélně dělený systém přípojníc se šroubovými spojkami. Každá sekce je napájena vlastním zdrojem a při poruše jednoho ze zdrojů je pak částečná záloha dalším zdrojem. Po přerušení dodávky jednoho ze zdrojů je nutná montáž spojek a v tuto dobu je nutné přerušení provozu. Údržba a revize je možná u vypnuté části zařízení. Obr. 10



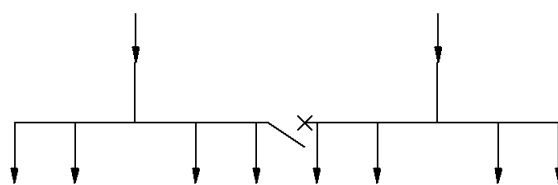
Obr. 6 Napájení jedním zdrojem



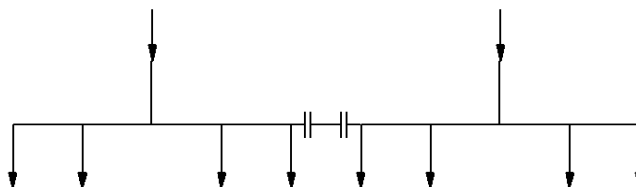
Obr. 8 Podélně dělený systém přípojníc s odpojovačem



Obr. 7 Systém přípojníc se dvěma zdroji

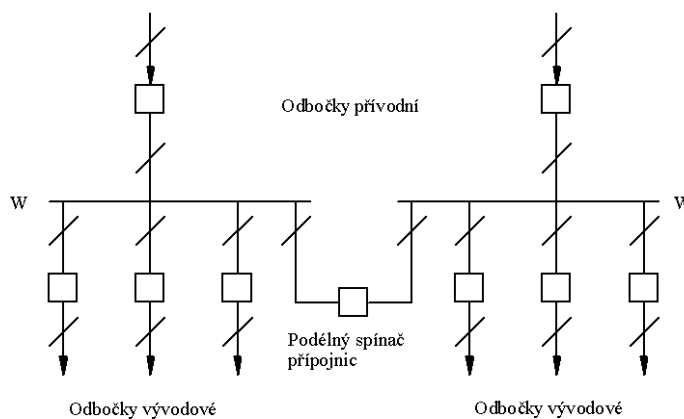


Obr. 9 Podélně dělený systém přípojníc s vypínačem



Obr. 10 Podélně dělený systém přípojníc se šroubovými spojkami

Na obrázku 11 je naznačeno schéma se zjednodušeným značením vypínačů a odpojovačů s názvy odboček. Odpojovače ve schématu jsou u rozvaděčů s výsuvnými vypínači realizovány připojovacím zařízením vypínače. Dané schéma je nejpoužívanější v průmyslových rozvodech a distribučních sítích.

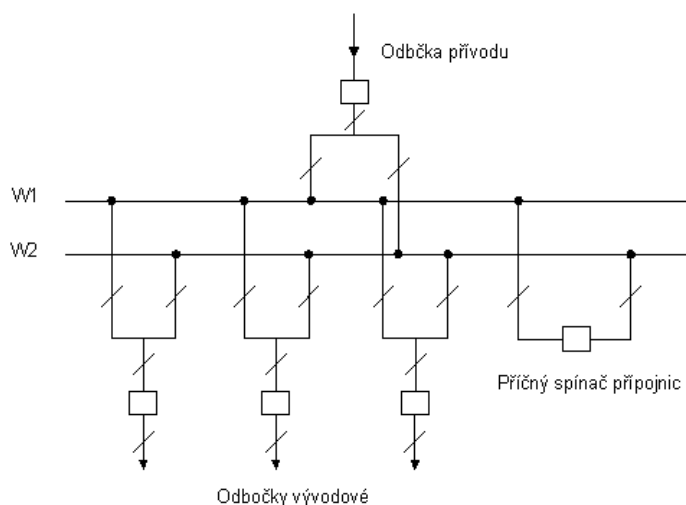


Obr. 11 Schéma se zjednodušeným značením

2.5.3 Dvojitý systém přípojnic

- Dvojitý systém přípojnic se používá tam, kde není možné ani krátkodobé přerušení dodávky při revizi.
- Tam, kde je nezbytné provoz odboček rozdělit do dvou skupin z některého z následujících důvodů
 - a) Rozdělení zdrojů k omezení zkratových proudů
 - b) Současné napájení ze dvou nespolupracujících zdrojů
 - c) Oddělení spotřebičů kolísavého příkonu od spotřebičů vyžadující neměnné napětí
 - d) Zajištění důležitých odběrů i v době výpadku některých napáječů zbývajících napáječů menšího výkonu.

Dvojitý systém přípojnic je nutné vybavit příčným spínačem, aby bylo možné přepojování odboček na druhý systém bez nutnosti přerušení provozu. Manipulovat s přípojnicovými odpojovači v sepnutém stavu je možné pouze při sepnutém spínači přípojnic. Na obrázku 12 je uvedeno schéma dvojitého systému přípojnic s jedním zdrojem a jednou přípojnici záložní.

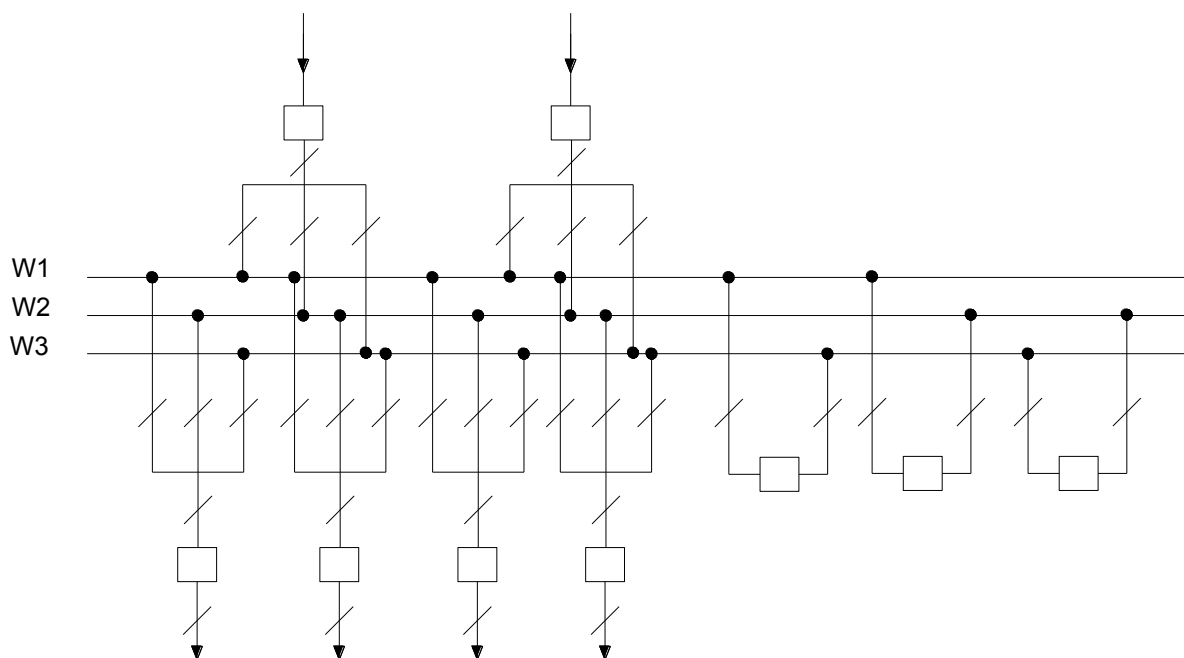


Obr. 12 Dvojitý systém přípojnic

2.5.4 Trojitý systém přípojníc

- Trojitý systém přípojníc se používá tam kde je nutné trvalé oddělení provozu dvojitého systému přípojníc a pro revizi přípojníc není možné ani krátkodobé přerušení dodávky.
- Tam, kde provoz je nutné rozdělit do tří skupin z jednoho z následujících důvodů:
 - a) tam, kde je nezbytné rozdělit zdroje k omezení velkých zkratových nebo provozních proudů.
 - b) tam, kde je nezbytné provozovat odděleně sít stejného napětí s ohledem na důležitost provozu.

Schéma trojitého systému přípojníc je uvedeno na obrázku 13. U rozvodných zařízení s velkým množstvím odboček se používá podélné dělení přípojnícových systémů na sekce jako u dvojitého systému přípojníc. Běžné je jednoduché vybavení odpojovači mezi sekcemi. [2], [1], [9]



Obr. 13 Trojitý systém přípojníc

2.6 Průmyslový rozvod elektrické energie

Sílnoproudý elektrický rozvod v průmyslových závodech má stejné obecné zásady, jako rozvod v objektech určených pro bydlení, zejména jako dimenzování vodičů, jisticích přístrojů a zajištění bezpečnosti osob. Jiné jsou pak velikosti přenášených výkonů, podmínky pro uložení silových vodičů, způsob zatěžování atd. Pro provoz větších průmyslových podniků je potřeba výkonu v řádu desítek MW i větších a proto je pro přenos energie nezbytná vhodná úroveň napětí.

Připojení průmyslového závodu na elektrizační soustavu je obvyklé přes napájecí transformátor ze soustavy vn nebo vvn podle velikosti odběru podniku. Velké podniky jsou obvykle napájeny více transformátory a jeden z nich může být provozován jako rezervní zdroj.

Napětí na sekundární straně napájecího transformátoru je závislé na velikosti odběru připojených spotřebičů a je obvykle na úrovni vn – pro velké spotřeby, nebo nn pro menší spotřebiče. U vnitrozávodních sítí se používají různé úrovně napětí 3, 6, nebo 10 kV, a u velkých průmyslových závodů se používají sítě o napájecím napětí 22 nebo 35 kV.

Podmínky pro připojení průmyslových podniků jsou jiné než pro připojení objektů občanské výstavby. U bytových objektů máme pouze spotřebiče třetího stupně důležitosti, kdežto u průmyslových objektů se můžeme setkat se spotřebiči všech stupňů důležitosti. Vzhledem k této skutečnosti musí odpovídat návrh a provedení silnoproudého průmyslového rozvodu.

2.6.1 Náhradní zdroje

Proto je nutné v průmyslovém závodu mít náhradní napájení nejdůležitějších spotřebičů realizováno náhradním nezávislým zdrojem. Za tento nezávislý napájecí zdroj lze pokládat transformátor napájený z nadřazené soustavy jiným vedením, než pracovní transformátor, nebo může být závod vybaven vlastním zdrojem. Vlastní zdroj průmyslového závodu může být samostatný generátor (turbogenerátor s odběrovou parní turbínou), sloužící jak pro napájení závodu, tak pro zásobování teplem. Další možností je použití dieselelektrického soustrojí, nebo akumulátorové baterie. Také můžeme použít kogenerační jednotku, která by vyráběla potřebnou elektrickou energii a také by sloužila pro dodávku tepla závodu.

Volbu daného záložního zdroje především ovlivňuje rychlost jeho najetí při výpadku. Rychlost záskoku je především dána požadavky technologií v pracovním cyklu závodu tam, kde se využívají spotřebiče prvního stupně důležitosti na nejdelší možnou dobu výpadku. U spotřebičů velmi citlivých na případné výpadky může být připojení na náhradní zdroje v době do 0,2 sekund. Tam, kde je i tato doba výpadku příliš dlouhá je nutné využít zařízení UPS (potřebné velikosti). UPS má za úkol pokrýt dobu do najetí pracovního nebo náhradního zdroje. Toto zařízení (Zdroj nepřerušovaného napájení) má vlastní zdroj energie (akumulátorová baterie) a zařízení určené k zajištění automatického záskoku bez přerušení napájení elektrickou energií.

2.6.2 Vedení v průmyslovém podniku

Návrh vodičů pro průmyslový rozvod je v podstatě stejný jako návrh vodičů pro jiné účely. Dimenzování a jištění vodičů je stejné, ale uložení vodičů a jejich zatěžování je specifické. U bytových objektů je nejběžnější uložení vodičů pod omítkou nebo v lištách, v průmyslových rozvodech je naopak běžné uložení vodičů na lávkách, roštech (i vícevrstvých), či lištách na povrchu stěn nebo uložení do kabelových kanálů. V menších průmyslových podnicích se obvykle používají kabelové kanály shora přístupné, zakryté ocelovým plechem. Ve velkých závodech se mohou využít i kabelové kanály průlezné nebo průchozí. Typ a velikost kabelového kanálu se navrhuje podle množství ukládaných kabelů a podle místních podmínek.

Pro dimenzování vodičů použitých v průmyslových rozvodech má mnohem větší význam kontrola hospodárnosti průřezu z důvodu zatížení dlouhodobého charakteru s dobou plných ztrát τ_z pravděpodobně mnohem větší než 1000 h/ rok. Pak je třeba provést kontrolu hospodárnosti průřezu.

Pro vodiče jsou nejužívanější vícežilové izolované vodiče, nebo zejména kabely, jejichž použití je v průmyslových rozvodech velmi časté. Silový rozvod je nejčastěji proveden jako paprskový, je-li nutná větší spolehlivost dodávky mohou být rozvaděče zapojeny do smyčky. Z provozních důvodů a dosažení selektivního působení ochran bývají smyčky často provozovány rozpojené. Ve větších průmyslových halách se používá přípojnícový rozvod, to je rozvod realizovaný z holých vodičů umístěných pod stropem pracovní haly, nejnižší však 5m na podlahou haly, odbočky z těchto vodičů se provádějí kabely po stěnách, sloupech, nebo vzduchem k nejbližším pracovním strojům. [1]

3. Teorie výpočtu zkratových poměrů

3.1 Zkrat

Zkrat je náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule.

Mezifázový zkrat je náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodiči se spojením na zem nebo bez něj.

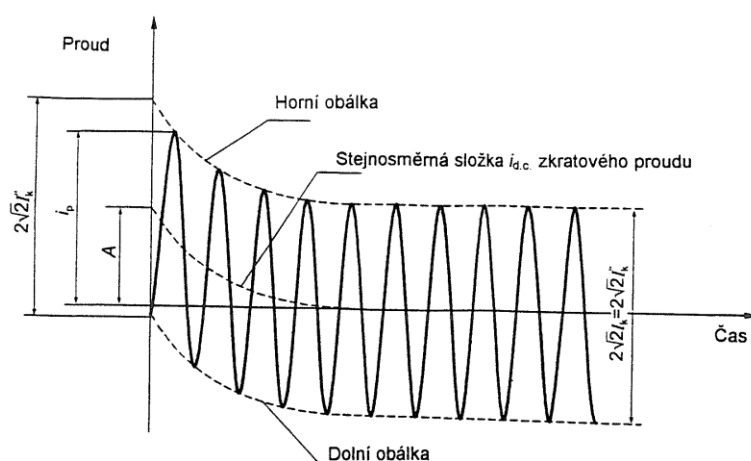
Zkrat mezi fází a zemí (jednofázový zkrat) je náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi vodičem a zemí v soustavě s uzlem uzemněným přímo nebo přes malou impedanci.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' je efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} je efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.

3.2 Charakteristiky zkratových proudů

Kompletní výpočet zkratových proudů určuje proudy jako funkce času v místě zkratu od počátku zkratu až do jeho konce. Zkratové proudy odpovídají okamžité hodnotě napětí na počátku zkratu (viz obrázek 14 a 15)



Obr. 14 Zkratový proud elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou

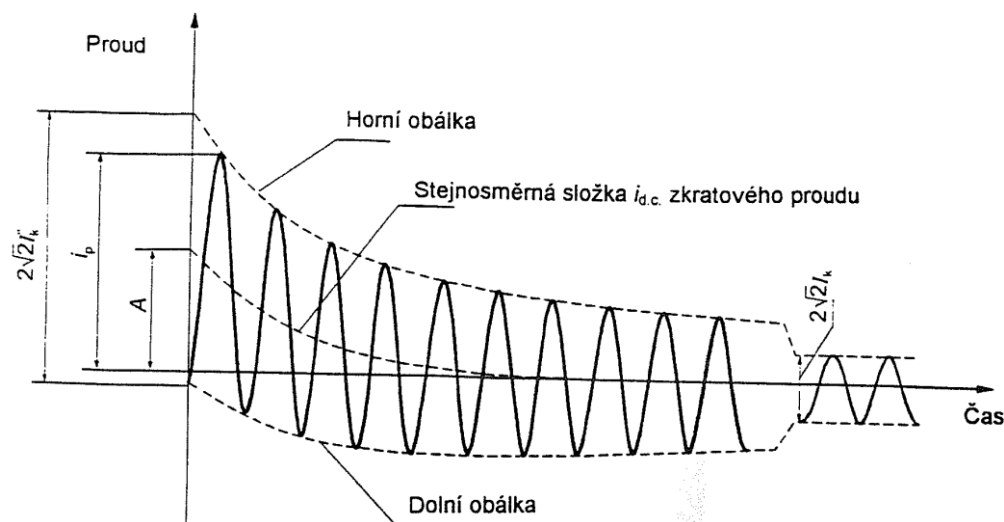
I_k'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud

i_p nárazový zkratový proud

I_k ustálený zkratový proud

$i_{d.c.}$ stejnosměrná složka zkratového proudu

A počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$



Obr. 15 Zkratový proud elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou

3.3 Předpoklady výpočtu

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu mezi fází a zemí.
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance K_T pro síťové transformátory.
- Odpory oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Pokud se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými hladinami napětí, je nutné přepočítat hodnoty impedance z jedné napěťové hladiny na druhou, obvykle na tu napěťovou hladinu, ve které se má určit zkratový proud.

3.4 Maximální zkratové proudy

Pro výpočet maximálních zkratových proudů lze zvolit následující podmínky:

- pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{max} podle tabulky 2.6.1,
- vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě pro omezení zkratového proudu,
- pokud je použita ekvivalentní impedance Z_0 jako reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů,
- motory musí být zahrnuty (podle hladiny napětí),
- uvažují se rezistence R_L vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20 °C.

3.5 Minimální zkratové proudy

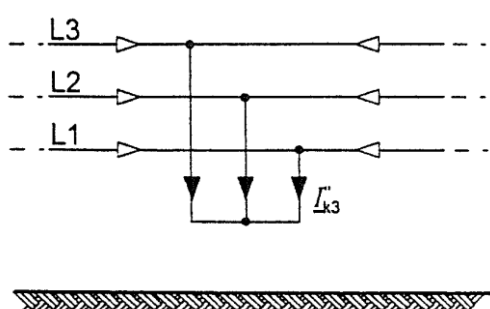
Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{min}
- vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu,
- motory musí být zanedbány,
- rezistence R_L vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při nejvyšší teplotě.

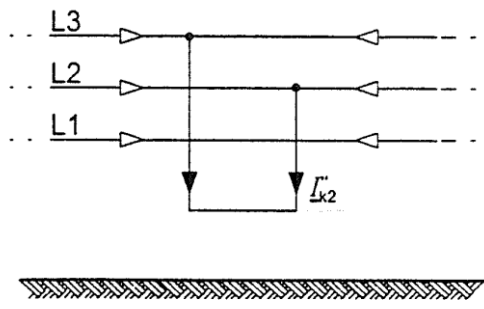
3.6 Metoda výpočtu

Metoda použitá pro výpočet je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Ekvivalentní napěťový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazovány svou vnitřní impedancí.

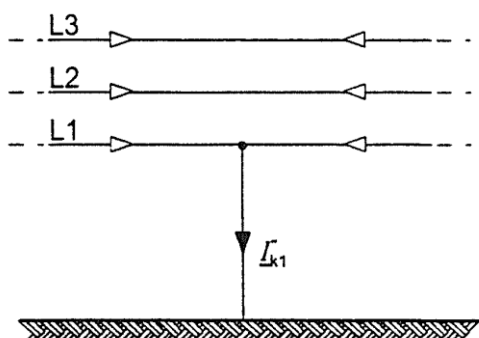
Ve všech případech se k určení zkratového proudu v místě zkratu F použije ekvivalentní napěťový zdroj. Provozní údaje o odběrech, o poloze přepínače odboček transformátoru, buzení generátoru, atd. jsou postradatelné. Odpadá nutnost provádět výpočty toků výkonů v různých stavech před zkratem.



Obr. 16 Souměrný trojfázový zkrat



Obr. 17 Dvoufázový zkrat



Obr. 18 Jednofázový zkrat

3.5 Zkratové impedance elektrických zařízení

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobného zařízení jsou sousledná a zpětná impedance soustavy $Z_{(1)} = Z_{(2)}$

Netočivá zkratová impedance $Z_{(0)} = U_{(0)} / I_{(0)}$ se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (například zemí, nulovým vodičem, zemnicím vodičem, kabelovým pláštěm a kabelovým pancířem). V tomto případě protéká společným zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky.

Impedance generátorů (G), síťových transformátorů (T) a elektrárenských bloků (S) se musí vynásobit impedančními korekčními součiniteli K_G , K_T a K_S nebo K_{S0} , pokud se zkratové proudy počítají pomocí ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu podle této normy.

Síťové napáječe:

$$Z_{S(1)} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_K} \quad (1)$$

U_n jmenovité napětí soustavy

c napěťový součinitel

S_K zkratový výkon soustavy

Impedance soustavy musí být přepočtena na napěťovou hladinu v místě zkratu podle vztahu :

$$Z_{S2(1)} = Z_{S(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad (2)$$

$Z_{S2(1)}$ impedance přepočtena na napěťovou hladinu U_2 v místě zkratu

$Z_{S(1)}$ impedance na napěťové hladině U_1

Lze uvažovat $Z_{(1)} = X_{(1)}$

Transformátory:

Dvouvinut'ové transformátory:

$$Z_T = \frac{u_{kn}}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad (3)$$

$$R_T = \frac{u_{Rn}}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{P_{knT}}{3I_{nT}^2} \quad (4)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (5)$$

U_{nT}	jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí
I_{nT}	jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí
S_{nT}	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
P_{knT}	jmenovité ztráty nakrátko transformátoru
u_{kn}	jmenovité napětí nakrátko v procentech
u_{Rn}	činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech

Pro praktický výpočet: $Z_T = X_T$

Korekční součinitel pro impedance dvou- a trojvinut'ových síťových transformátorů

Síťový transformátor je transformátor spojující dvě nebo více sítí s rozdílným napětím. U dvouvinut'ových transformátorů s přepínačem odboček při zatížení i bez něj se musí navíc k impedancím spočítaným podle rovnic (4) až (6) zavést korekční součinitel $K_T : Z_{TK} = K_T \cdot Z_T$, kde

$$Z_T = R_T + jX_T$$

$$K_T = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} \quad (6)$$

Kde x_T je poměrná reaktance transformátoru $x_T = X_T \cdot (U_{nT}^2 / S_{nT})$ a c_{\max} z tabulky 2.6.1 odpovídá jmenovitému napětí sítě nižšího napětí síťového transformátoru.

Reaktory omezující zkratový proud:

Sousledné, zpětné a netočivé zkratové impedance jsou stejné za předpokladu geometrické souměrnosti. Reaktory omezující zkratový proud se považují za součást zkratové impedance.

$$Z_{R(1)} = \frac{u_{kR}}{100\%} \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{nR}} \quad \text{a } R_R \ll X_R \quad (7)$$

u_{kR} impedanční napětí reaktoru

I_{nR} jmenovitý proud reaktoru

U_n jmenovité napětí soustavy

Alternátor:

$$X_{A(1)} = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} \quad (8)$$

x_d'' rázová reaktance alternátoru

U_{nG} jmenovité napětí alternátoru

S_{nG} jmenovitý zdánlivý výkon alternátoru

Vedení:

$$X_{(1)} = X_k \cdot l \quad (9)$$

$$R_{(1)} = R_k \cdot l \quad (10)$$

$$Z_{(1)} = \sqrt{R_{(1)}^2 + X_{(1)}^2} \quad (11)$$

X_k reaktance sousledné složky vedení

R_k rezistence sousledné složky vedení

l délka vedení

Pro rezistivitu se mohou použít následující hodnoty:

Měď $\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$

Hliník $\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$

Slitina hliníku $\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$

Asynchronní motory:

$$Z_{M(1)} = \frac{1}{I_{LR} / I_{nM}} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nM}} \quad (12)$$

Rezistenci motoru vzhledem k velikosti reaktance můžeme zanedbat.

U_n jmenovité napětí motoru

S_{nM} jmenovité zdánlivý příkon motoru

I_{LR} / I_{nM} poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru při zabrzděném motoru

3.6 Výpočet zkratových proudů

Počáteční rázový zkratový proud I_{k3}'' při třífázovém zkratu

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} \quad (13)$$

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' \quad (14)$$

Počáteční rázový zkratový proud I_{k2}'' při třífázovém zkratu

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} \quad (15)$$

Počáteční rázový zkratový proud I_{k1}'' při jednofázovém zkratu

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}} \quad (16)$$

Pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu je dovoleno uvažovat $Z_{(1)} = Z_{(2)}$

$Z_{(1)}$ Sousedná impedance zkratového obvodu

$Z_{(2)}$ Zpětná impedance zkratového obvodu

$Z_{(0)}$ Netočivá impedance zkratového obvodu

c	Napěťový součinitel
U_n	jmenovité napětí v místě zkratu
S_{k3}^n	počáteční souměrný rázový zkratový výkon

Tabulka 2.6.1 Napěťový součinitel

Jmenovité napětí	Napěťový součinitel	
	C_{max}	C_{min}
Nízké napětí	1,1	0,95
Vysoké napětí	1,1	1
Velmi vysoké napětí	1,1	1

[7],[6]

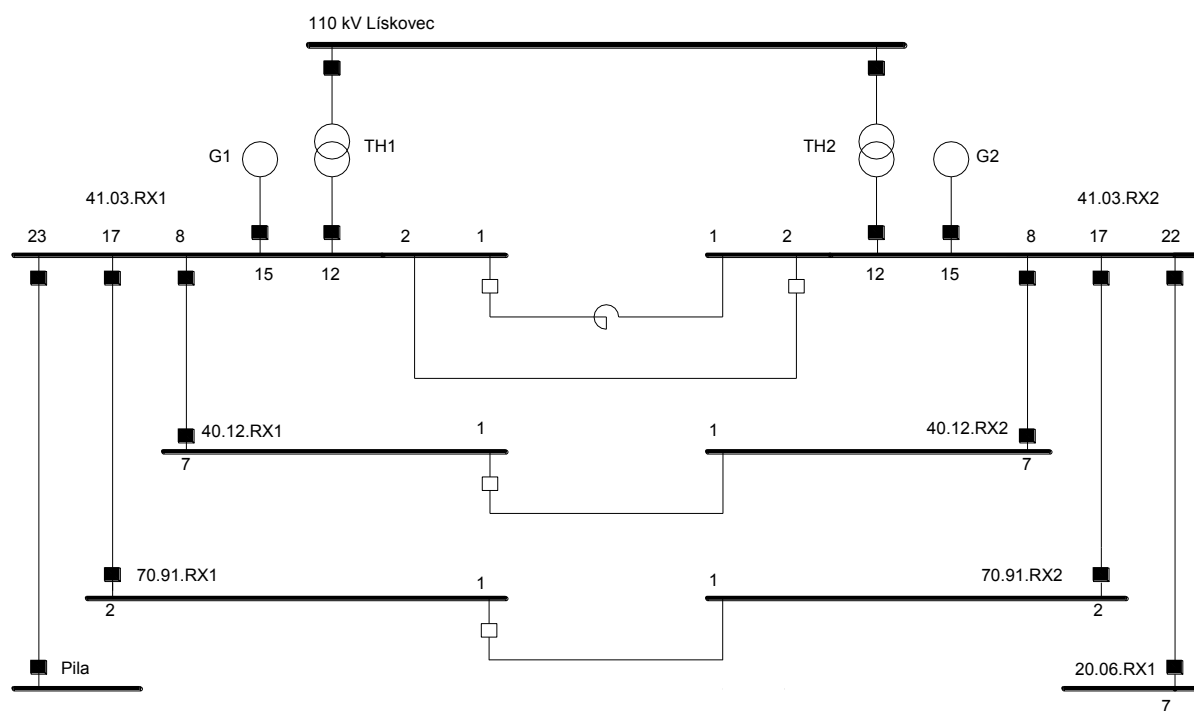
4. Popis provozního zapojení sítě průmyslového podniku

Průmyslový podnik je napájen nadzemním vedením 110 kV z rozvodny Lískovec (ČEZ Distribuce) se zkratovým příspěvkem $S_{kmax} = 2867,40\text{MVA}$ a $S_{kmin} = 1195,5\text{ MVA}$. Poté prostřednictvím dvou napájecích dvouvinutových transformátorů TH1 a TH2 každý o jmenovitém výkonu 25 MVA. Transformátory přeměňují velmi vysoké napětí distribuční sítě 110 kV na vysoké napětí 10 kV užité pro rozvod elektrické energie v rámci průmyslového podniku.

Transformátory TH1 a TH2 jsou připojeny svým sekundárním vinutím na hlavní rozvodny průmyslového podniku 41.03.RX1 a 41.03.RX2, kde transformují napětí na hladinu vn 10 kV. Prostřednictvím vývodů z hlavních rozvodů jsou pak dále napájeny (podružné rozvodny, motory a generátory připojené přímo v hlavních rozvodnách). Vývody jsou číslovány podle zařízení, které napájejí.

Vývody jsou vybaveny odpojovači a vypínači, ochranami a dalšími nutnými přístroji podle důležitosti a potřeby změny zapojení. Dále jsou hlavní rozvodny 41.03.RX1 a 41.03.RX2 vybaveny podélným spínačem přípojníc určeným k případné změně zapojení a reaktorem sloužícím k omezení zkratového proudu, který je nebo není zařazen podle daného zapojení.

V hlavních rozvodnách 41.03.RX1 a 41.03.RX2 jsou dále připojeny dva synchronní generátory G1 a G2, každý o výkonu 25,4 MW, sloužícími jako náhradní zdroje pro napájení důležitých spotřebičů. Na obrázku 19 je naznačeno hlavní schéma zapojení průmyslového podniku.

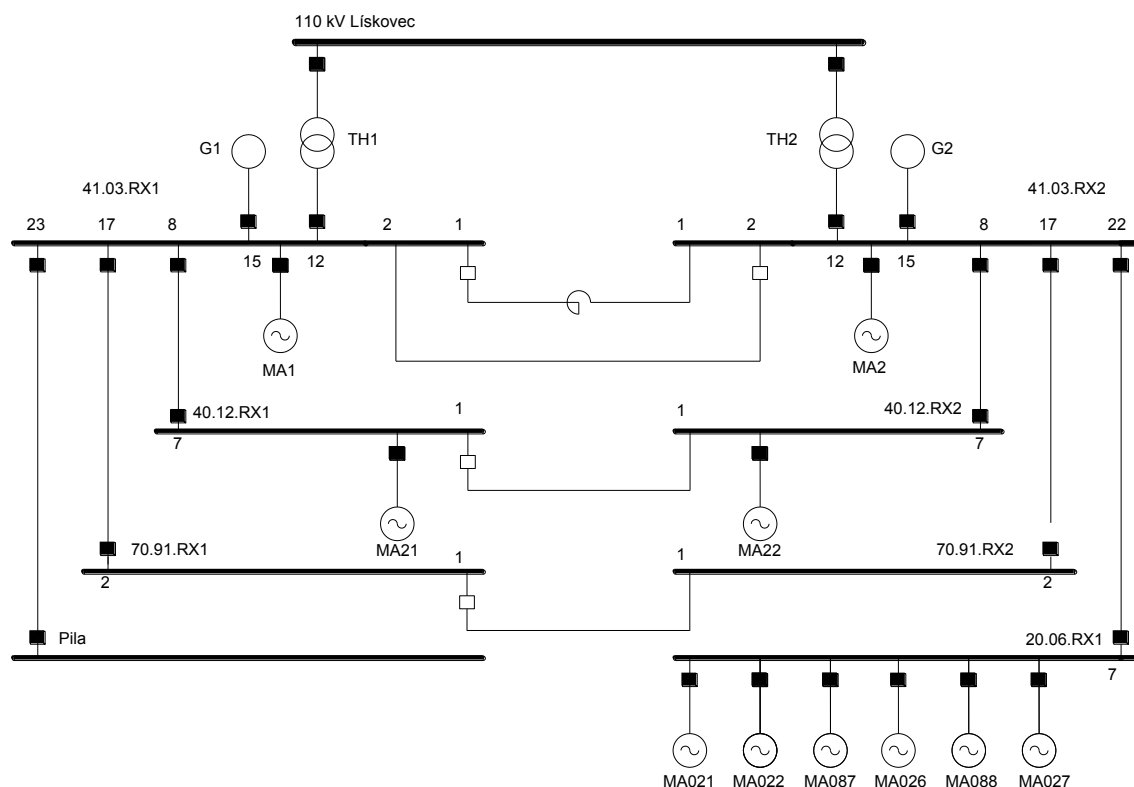


Obr. 19 Hlavní schéma zapojení

Z hlavních rozvodn 41.03RX1 a 41.03RX2 jsou kabelovými vývody napájeny podružné rozvodny z 41.03.RX1 do (40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila) a z 41.03.RX2 do (40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1). Použité kabely jsou AYKTCY a CYKCY, průřez a počet kabelů je pak dán velikostí jednotlivých odběrů.

Jak je naznačeno na obrázku 21. na hlavních i podružných rozvodnách průmyslového podniku jsou připojeny další spotřebiče, které je nutno zahrnout do výpočtu zkratových poměrů. Na hlavní rozvodně 41.03.RX1 je připojen už výše zmíněný generátor G1 a synchronní motor MA1 o výkonu 1,16 MW. Dále pak na hlavní rozvodně 41.03.RX2 je připojen už výše zmíněný generátor G2 a synchronní motor MA2 o výkonu 1,16 MW.

Na podružné rozvodně 40.12.RX1 je připojen jeden asynchronní motor vn MA21 o výkonu 1,2 MW. V podružné rozvodně 40.12.RX2 je připojen stejně jako v 40.12.RX1 jeden asynchronní motor vn MA22 o výkonu 1,2 MW. V případě rozvodny 20.06.RX1 je to šest asynchronních motorů vn MA021(0,54MW), MA022(0,54MW), MA087(0,8 MW), MA026 (0,9MW), MA088(0,8MW) a MA027(0,5MW).



Obr. 20 Hlavní schéma zapojení s připojeními (asynchronními a synchronními motory, generátory) použitými ve výpočtech

Z hlavního schématu průmyslového podniku na obrázku 19. a 20. je zřejmé, že je možné provozovat síť vn v několika různých způsobech zapojení.

5. Výpočet zkratových poměrů na zadaných rozvodnách

5.1 Výpočet zkratových impedancí zařízení nacházející se v průmyslovém podniku.

Síťové napáječe:

Pro výpočet minimálních zkratových poměrů :

$$Z_{S \min(1)} = \frac{c_{\min} U_n^2}{S_{K \min}} = \frac{1 \cdot 110^2}{1195,5} = 10,121 \, \Omega$$

Přepočet na hladinu napětí v místě zkratu:

$$Z_{S \min 2(1)} = Z_{S \min(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = 10,121 \cdot \left(\frac{10}{110} \right)^2 = 0,08364 \, \Omega$$

Pro výpočet maximálních zkratových poměrů:

$$Z_{S \max(1)} = \frac{c_{\max} U_n^2}{S_{K \max}} = \frac{1,1 \cdot 110^2}{2867,40} = 4,642 \, \Omega$$

Přepočet na hladinu napětí v místě zkratu:

$$Z_{S \max 2(1)} = Z_{S \max(1)} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 = 4,642 \cdot \left(\frac{10}{110} \right)^2 = 0,03836 \, \Omega$$

Transformátory:

$$Z_{TH1(1)} = \frac{u_{kn}}{100} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{16,8}{100} \cdot \frac{10,5^2}{25} = 0,741 \, \Omega$$

$$Z_{TH1(1)} = X_{TH1(1)}$$

Poměrná reaktance transformátoru:

$$x_{TH1(1)} = \frac{X_{TH1(1)}}{\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}}} = \frac{0,741}{\frac{10,5^2}{25}} = 0,168$$

Korekční součinitel:

$$K_T = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} = 0,95 \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,168} = 0,9493$$

$$Z_{TH1K(1)} = Z_{TH1(1)} \cdot K_T = 0,741 \cdot 0,9493 = 0,703 \, \Omega$$

$$Z_{TH1K(1)} = Z_{TH2K(1)}$$

Reaktory:

$$Z_{L1(1)} = \frac{u_{kR}}{100\%} \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{nR}} = \frac{7,19 \cdot 10}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 1} = 0,4151 \, \Omega$$

Kabely:

Příklad výpočtu kabel z 41.03.RX1 do 40.12.RX1

$$X_{(1)} = X_k \cdot l = 0,097 \cdot 0,05 = 0,00485 \, \Omega$$

$$R_{(1)} = R_k \cdot l = 0,125 \cdot 0,05 = 0,00625 \, \Omega$$

Dva kabely paralelně:

$$Z_{V1(1)} = \sqrt{R_{(1)}^2 + X_{(1)}^2} = \sqrt{\left(\frac{0,00485}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,00625}{2}\right)^2} = 0,00396 \, \Omega$$

Tabulka 5.1.1 Kabely z rozvodny 41.03.RX1 do

do	typ	průřez	počet	délka	R _k	X _k	X ₍₁₎	R ₍₁₎	Z ₍₁₎	název
[-]	[-]	[mm ²]	[-]	[m]	[W/km]	[W/km]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[-]
40.12.RX1	10-AYKTCY	3 x 240	2	50	0,125	0,097	0,00485	0,00625	0,00396	Z _{v1}
TH1	10-CYKCY	3 x 400	4	20	0,047	0,088	0,00176	0,00094	0,00050	Z _{v2}
G1	10-CYKCY	3 x 500	2	60	0,0366	0,0855	0,00513	0,00220	0,00279	Z _{v3}
70.91.RX1	10-AYKTCY	3 x 240	2	540	0,125	0,097	0,05238	0,06750	0,04272	Z _{v4}
Pila	22-AXEKVCEY	3 x 1 x 240	2	1200	0,125	0,113	0,13560	0,15000	0,10110	Z _{v5}

Tabulka 5.1.2 Kabely z rozvodny 41.03.RX2 do

do	typ	průřez	počet	délka	R _k	X _k	X ₍₁₎	R ₍₁₎	Z ₍₁₎	název
[-]	[-]	[mm ²]	[-]	[m]	[W/km]	[W/km]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[-]
40.12.RX2	10-AYKTCY	3 x 240	2	50	0,125	0,097	0,00485	0,00625	0,00396	Z _{v6}
TH2	10-CYKCY	3 x 400	4	20	0,047	0,088	0,00176	0,00094	0,00050	Z _{v7}
G2	10-CYKCY	3 x 500	2	60	0,0366	0,0855	0,00513	0,002196	0,00279	Z _{v8}
70.91.RX2	10-AYKTCY	3 x 240	2	540	0,125	0,097	0,05238	0,0675	0,04272	Z _{v9}
20.06.RX1	10-AYKTCY	3 x 240	2	480	0,125	0,097	0,04656	0,06	0,03797	Z _{v10}

Synchronní generátory, motory:

Příklad výpočtu:

$$X_{G1(1)} = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{16,5 \cdot 10^2}{100 \cdot 25,4} = 0,65$$

Tabulka 5.1.3 Generátory a synchronní motory na hlavních rozvodnách

označení	U _n	S _n	x _d	Z
-	[kV]	[MW]	[%]	[Ω]
G1	10	25,4	16,5	0,6496
G2	10	25,4	16,5	0,6496
MA1	10	1,16	12,8	11,0345
MA2	10	1,16	12,8	11,0345

Asynchronní motory:

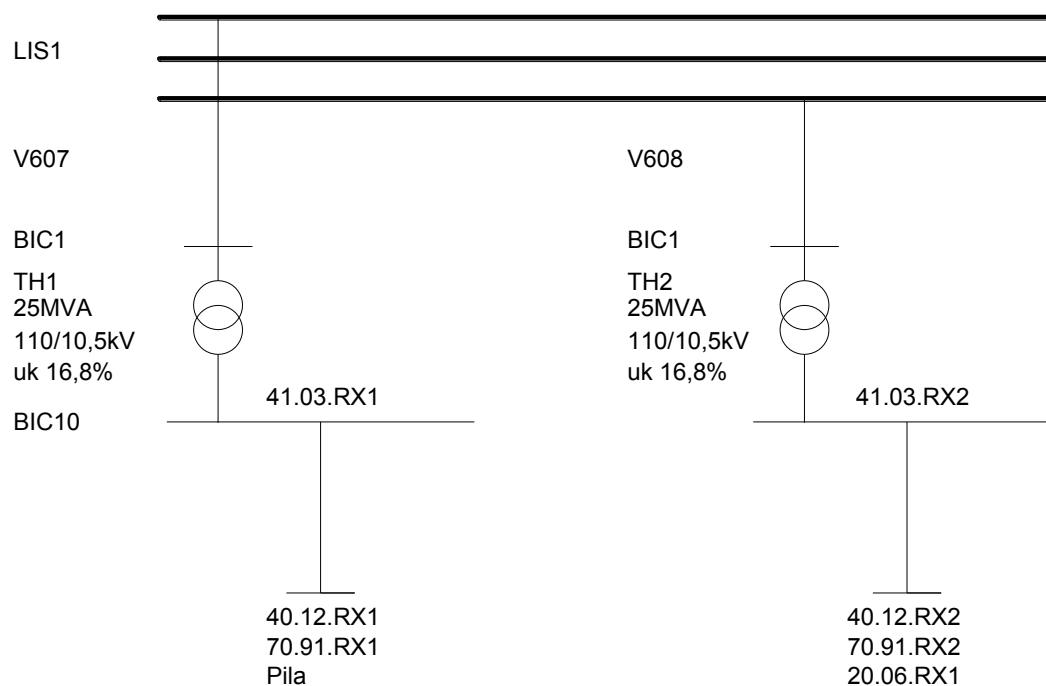
Příklad výpočtu:

$$S_{nM} = \frac{P_n}{\cos \varphi} = \frac{0,54}{0,89} = 0,61 \quad Z_{MA021(1)} = \frac{1}{I_{LR} / I_{nM}} \cdot \frac{U_n^2}{S_{nM}} = \frac{1 \cdot 10^2}{\frac{5 \cdot 37}{37} \cdot 0,61} = 32,96$$

Tabulka 5.1.4 Asynchronní motory

označení	P _n	S _n	U _n	I _n	cosφ	I _z	Z _M
-	[MW]	[MVA]	[kV]	[A]	[-]	[x I _{nM}]	[Ω]
MA021	0,5400	0,6067	10,0	37,00	0,890	5,0	32,9630
MA022	0,5400	0,6067	10,0	37,00	0,890	5,0	32,9630
MA087	0,8000	1,0959	10,0	67,00	0,730	5,0	18,2500
MA026	0,9000	1,0227	10,0	62,00	0,880	5,0	19,5556
MA088	0,8000	1,0959	10,0	67,00	0,730	5,0	18,2500
MA027	0,5000	0,5747	10,0	35,00	0,870	5,0	34,8000
MA21	1,2000	1,3333	10,0	81,00	0,900	5,0	15,0000
MA22	1,2000	1,3333	10,0	81,00	0,900	5,0	15,0000

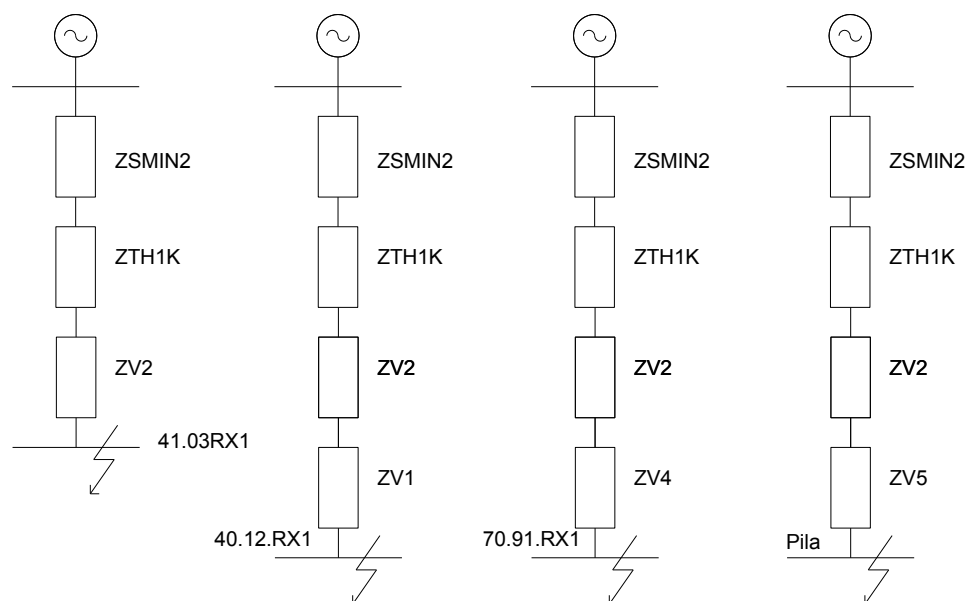
5.2 Varianta 1.MIN



Obr.21 Minimální zkrat varianta 1.

Na obrázku 21 je naznačeno schéma zapojení pro výpočet minimálních zkratových poměrů podle první varianty. Při tomto zapojení není zapojen podélný spínač přípojníc mezi hlavními rozvodnami průmyslového podniku 41.03.RX1 a 41.03.RX2. Rozvodny (41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila) jsou napájeny pouze transformátorem TH1, který je napájen vedením V607 (110kV) z rozvodny Lískovec. Stejně tak rozvodny (41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1) jsou napájeny pouze transformátorem TH2, který je napájen vedením V608 (110kV) z rozvodny Lískovec.

Zkraty na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila:



Obr. 22 Zkraty na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila

Zkrat na rozvodně 41.03.RX1 (Příklad výpočtu):

Celková impedance:

$$Z_c = Z_{SMIN2} + Z_{TH1K} + Z_{V2} = 0,08364 + 0,703 + 0,0005 = 0,7871 \, \Omega$$

Minimální počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} = \frac{1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0,7871} = 7,33 \, kA$$

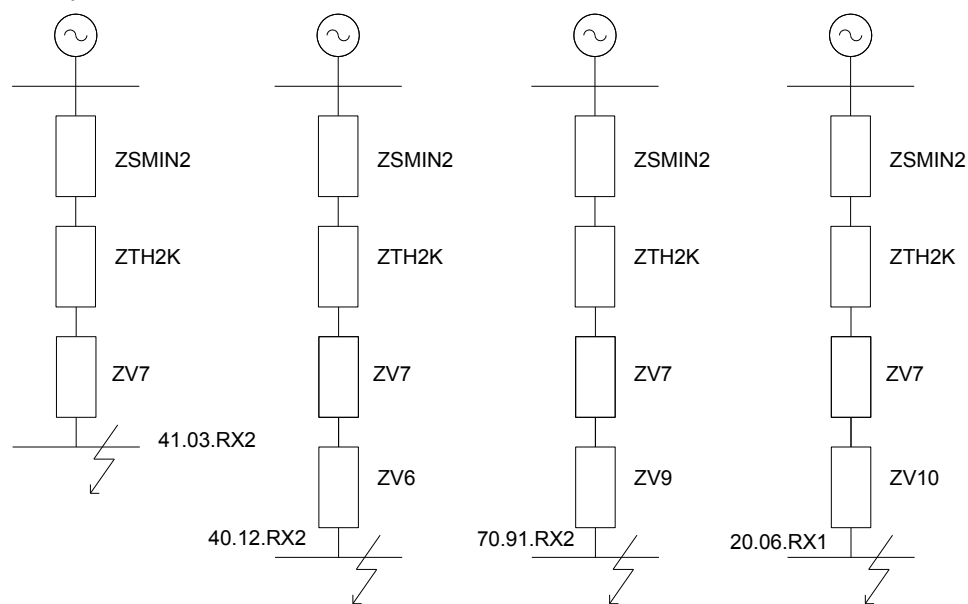
Počáteční souměrný rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu:

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 7,33 = 127,04 \, MVA$$

Tabulka 5.2.1.1 zkraty na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila

Zkrat na	Z_c	I_{k3}''	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,7871	7,33	127,04
40.12.RX1	0,7911	7,30	126,41
70.91.RX1	0,8299	6,96	120,50
Pila	0,8882	6,50	112,58

Zkraty na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1

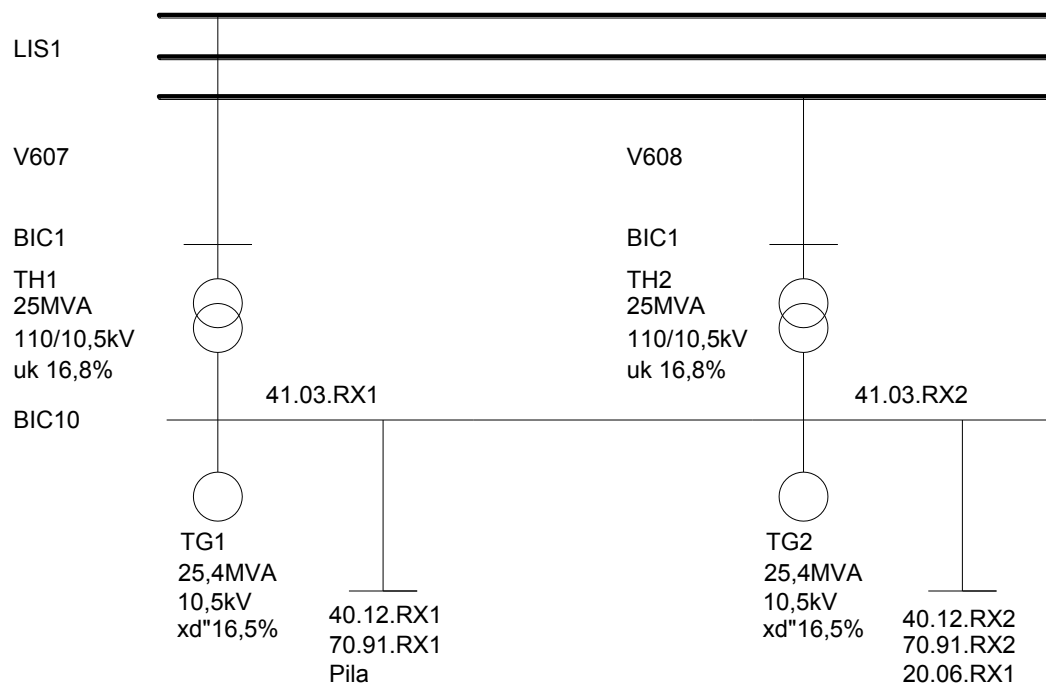


Obr. 23 Zkraty na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1

Tabulka 5.2.1.2 zkraty na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX2	0,7871	7,33	127,04
40.12.RX2	0,7911	7,30	126,41
70.91.RX2	0,8299	6,96	120,50
20.06.RX1	0,8251	7,00	121,20

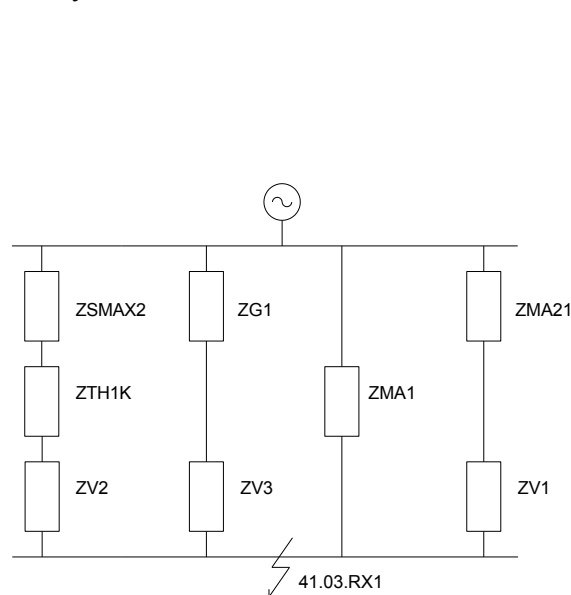
5.2 Varianta 1.MAX



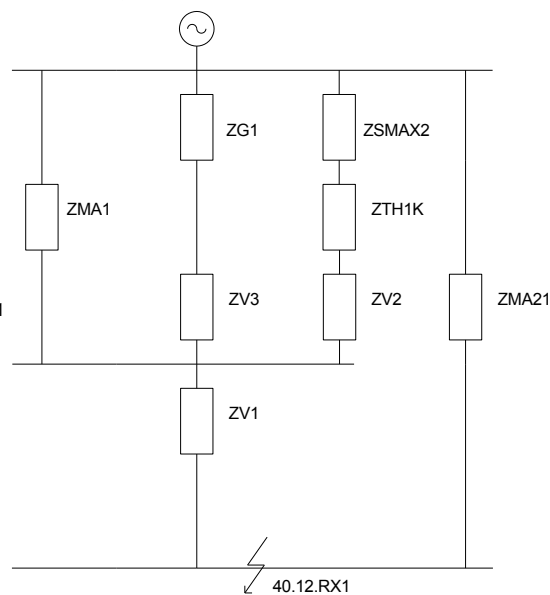
Obr. 24 Maximální zkrat varianta 1.

Na obrázku 24. je naznačeno schéma zapojení pro výpočet maximálních zkratových poměrů podle první varianty. Při tomto zapojení není zapojen podélný spínač přípojníc mezi hlavními rozvodnami průmyslového podniku 41.03.RX1 a 41.03.RX2. Napájení průmyslového podniku je realizováno stejně jako v případě (Minimální zkrat varianta 1.) . Při výpočtu maximálních zkratových poměrů do výpočtu zahrnujeme všechny motory, generátory na hladině vysokého napětí v hlavních i podružných rozvodnách.

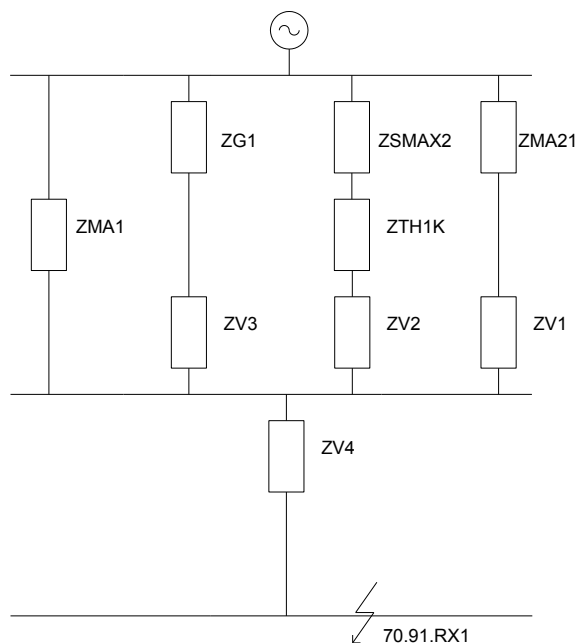
Zkraty na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila:



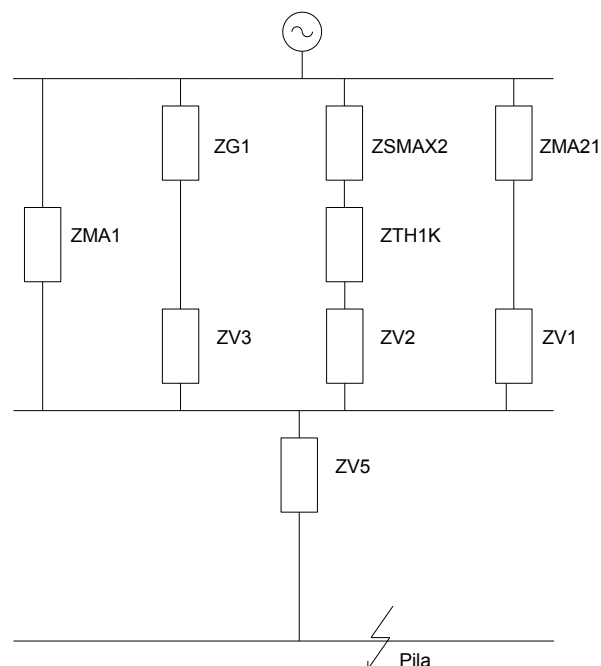
Obr.25 Zkrat na rozvodně 41.03.RX1



Obr.26 Zkrat na rozvodně 40.12.RX1



Obr.27 Zkrat na rozvodně 70.91.RX1



Obr.28 Zkrat na rozvodně Pila

Zkrat na rozvodně 41.03.RX1 (Příklad výpočtu):

Celková impedance:

$$Z_c = \frac{1}{\frac{1}{Z_{SMAX2} + Z_{TH1K} + Z_{V2}} + \frac{1}{Z_{G1} + Z_{V3}} + \frac{1}{Z_{MA1}} + \frac{1}{Z_{MA21} + Z_{V1}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0,03836 + 0,703 + 0,0005} + \frac{1}{0,6496 + 0,00279} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{15 + 0,00396}} = 0,3292\Omega$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0,3292} = 19,29 \text{ kA}$$

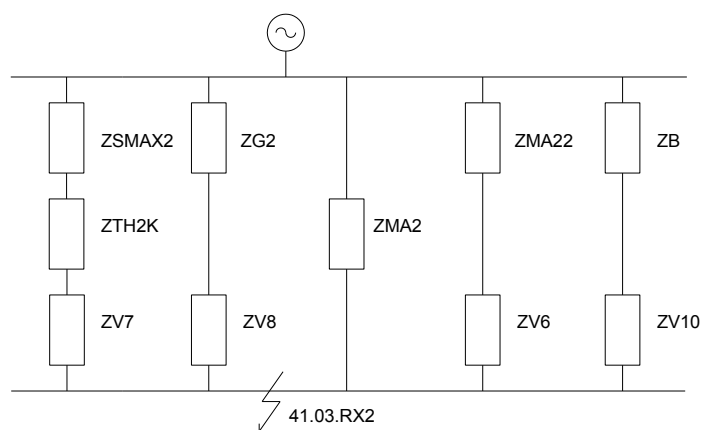
Počáteční souměrný rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu:

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 19,29 = 334,19 \text{ MVA}$$

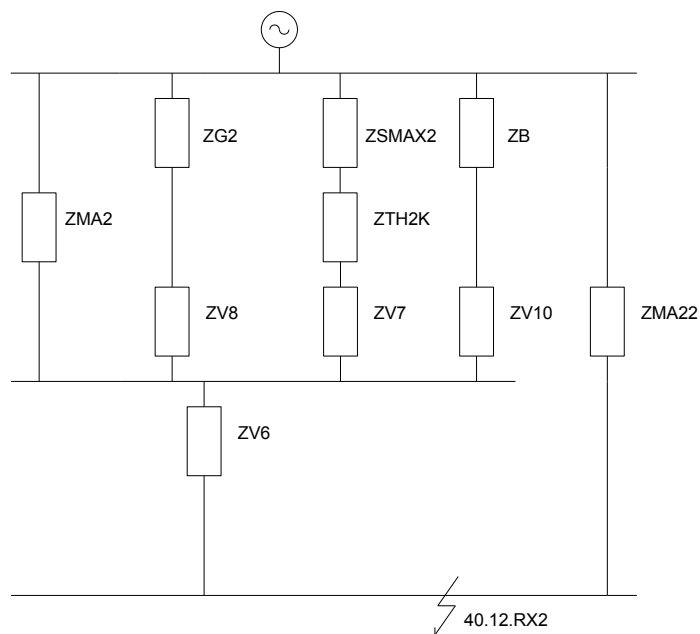
Tabulka 5.2.2.1 zkrat na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,3292	19,29	334,19
40.12.RX1	0,3329	19,08	330,39
70.91.RX1	0,3719	17,08	295,80
Pila	0,4303	14,76	255,66

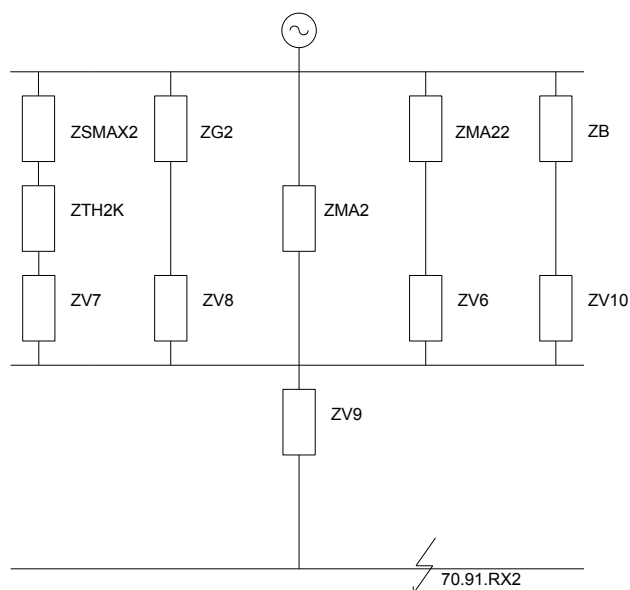
Zkrat na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1:



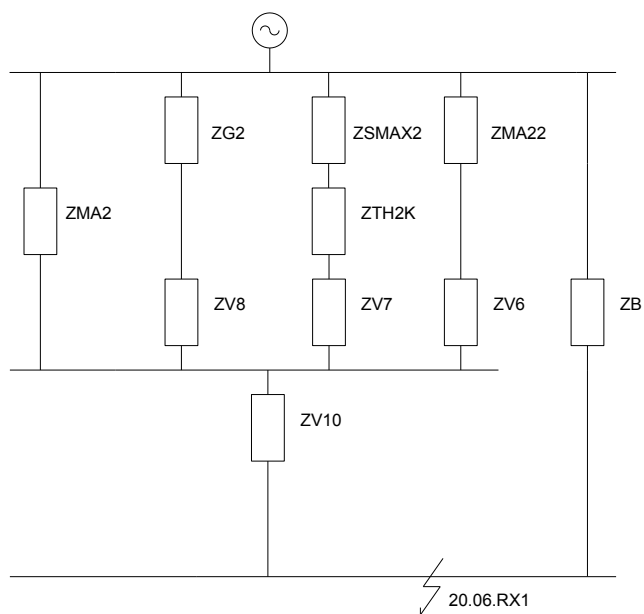
Obr.29 Zkrat na rozvodně 41.03.RX2



Obr.30 Zkrat na rozvodně 40.12.RX2



Obr.31 Zkrat na rozvodně 70.91.RX2

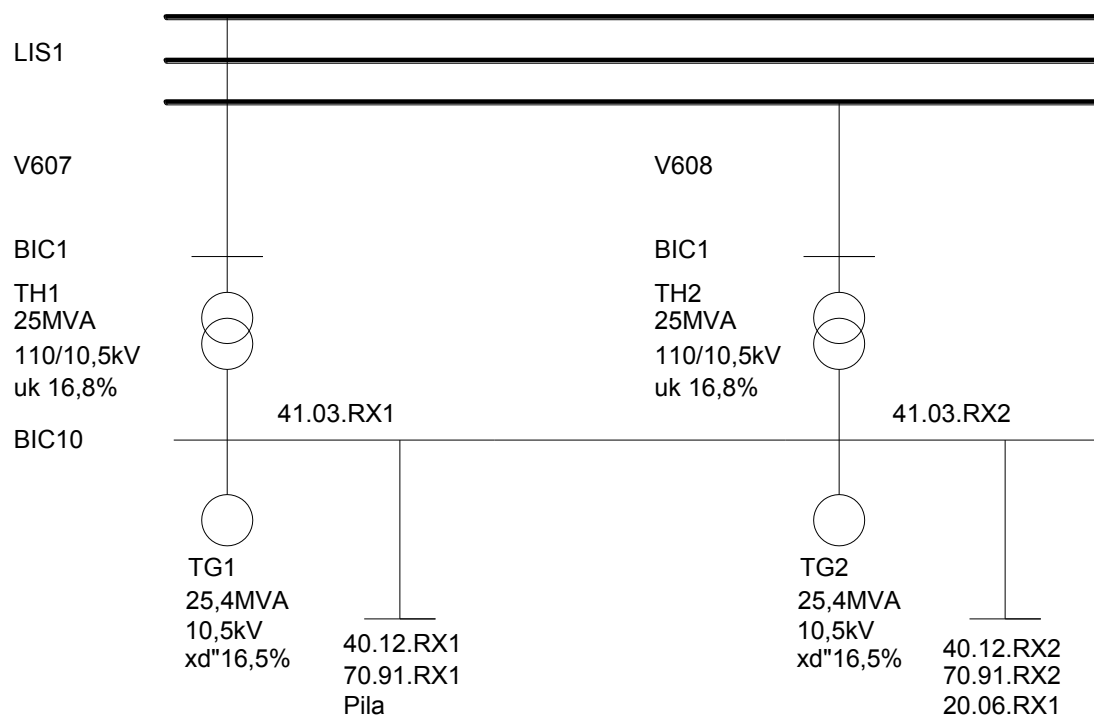


Obr.32 Zkrat na rozvodně 20.06.RX1

Tabulka 5.2.2.2 zkraty na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX2	0,3043	20,87	361,44
40.12.RX2	0,3081	20,61	356,99
70.91.RX2	0,3471	18,30	316,95
20.06.RX1	0,3363	18,89	327,13

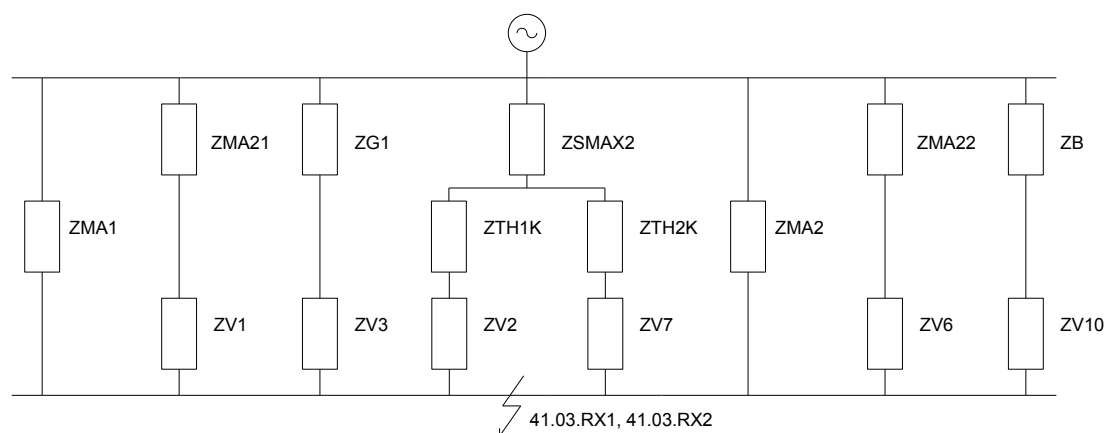
5.3 Varianta 2. MAX



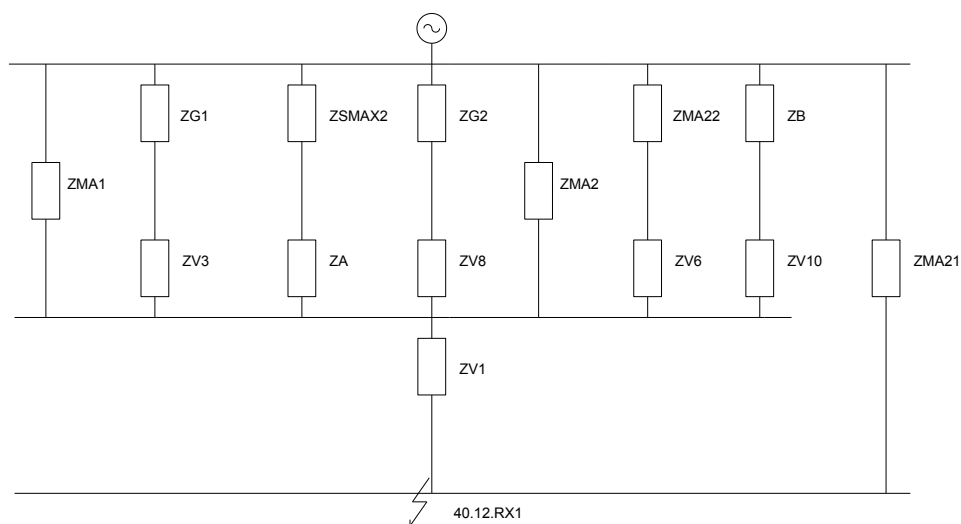
Obr. 33 Maximální zkrat varianta 2.

Na obrázku 33. je naznačeno schéma zapojení průmyslového podniku pro výpočet maximálních zkratových poměrů podle druhé varianty. Při tomto zapojení je zapojen podélný spínač přípojníc mezi hlavními rozvodnami průmyslového podniku 41.03.RX1 a 41.03.RX2. Rozvodny (41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila, 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1) jsou napájeny oběma transformátory TH1 a TH2. Tyto transformátory jsou napájeny dvěma vedeními V607 a 608 (110 kV) z rozvodny Lískovec. Toto zapojení má větší spolehlivost dodávky než první varianta.

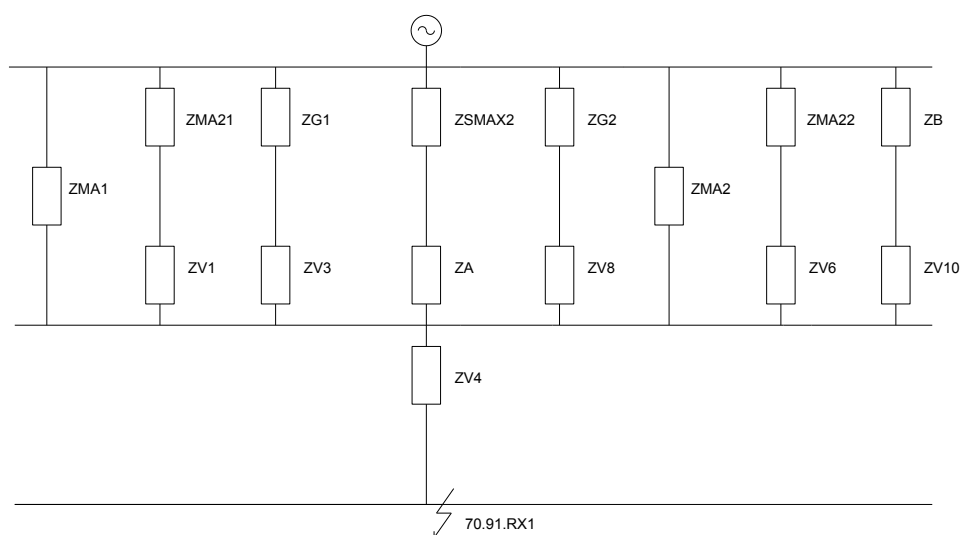
Zkrat na rozvodnách (41.03.RX1, 41.03.RX2), 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila:



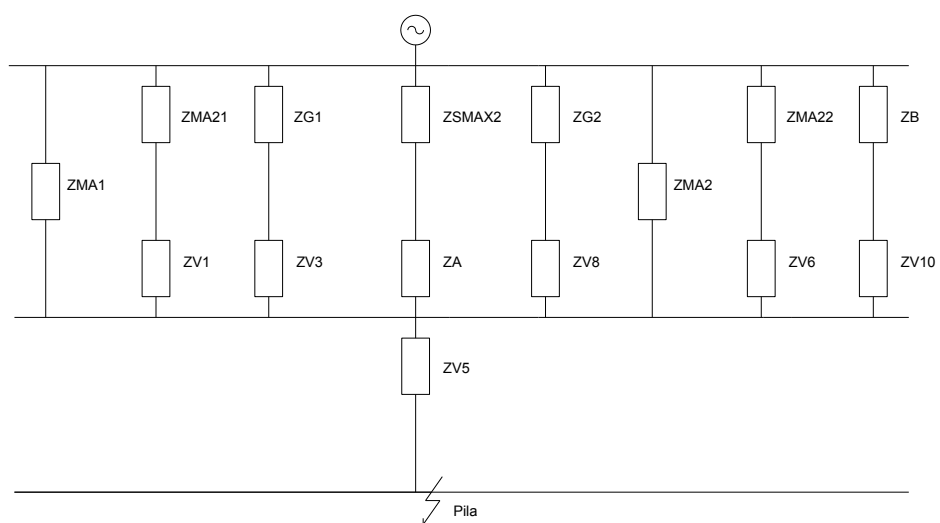
Obr.34 Zkrat na rozvodně 41.03.RX1, 41.03.RX2



Obr.35 Zkrat na rozvodně 40.12.RX1



Obr.36 Zkrat na rozvodně 70.91.RX1



Obr.37 Zkrat na rozvodně Pila

Zkratky na rozvodnách 41.03.RX1, 41.03.RX2 (příklad výpočtu)

Náhradní impedance Z_A :

$$Z_A = \frac{1}{\frac{1}{Z_{V2} + Z_{TH1K}} + \frac{1}{Z_{TH2K} + Z_{V7}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,0005 + 0,703} + \frac{1}{0,0005 + 0,703}} = 0,35175 \, \Omega$$

Náhradní impedance Z_P :

$$\begin{aligned} Z_P &= \frac{1}{Z_{MA1}} + \frac{1}{Z_{V1} + Z_{MA21}} + \frac{1}{Z_{V3} + Z_{G1}} + \frac{1}{Z_A + Z_{SMAX2}} + \frac{1}{Z_{V8} + Z_{G2}} + \\ &+ \frac{1}{Z_{MA2}} + \frac{1}{Z_{V6} + Z_{MA22}} + \frac{1}{Z_{V10} + Z_B} = \\ &= \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,00396 + 15} + \frac{1}{0,00279 + 0,6496} + \frac{1}{0,35175 + 0,003836} + \frac{1}{0,00279 + 0,6496} + \\ &+ \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,00396 + 15} + \frac{1}{0,03797 + 3,99784} = 6,192 \, \Omega \end{aligned}$$

Celková impedance:

$$Z_c = \frac{1}{Z_P} = \frac{1}{6,192} = 0,1615 \, \Omega$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0,1615} = 39,32 \, kA$$

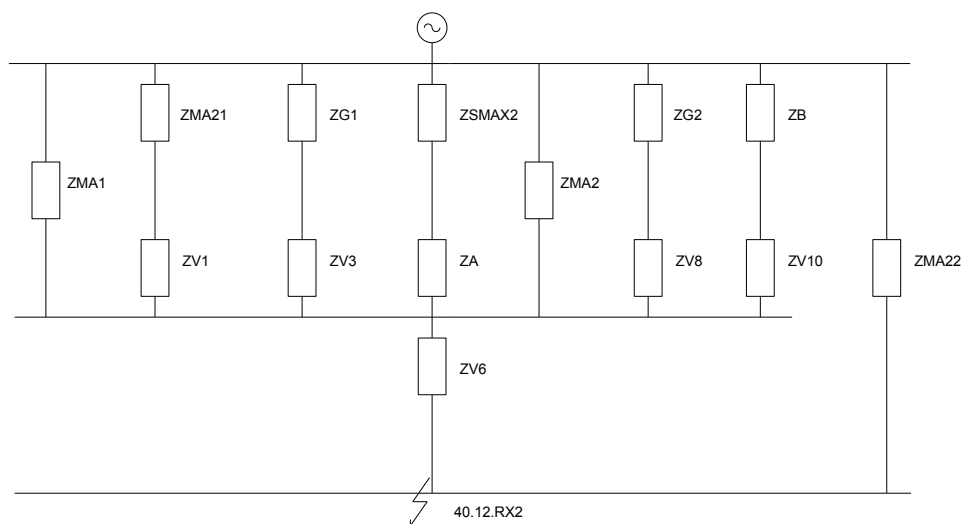
Počáteční souměrný rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu:

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 39,32 = 681,05 \, MVA$$

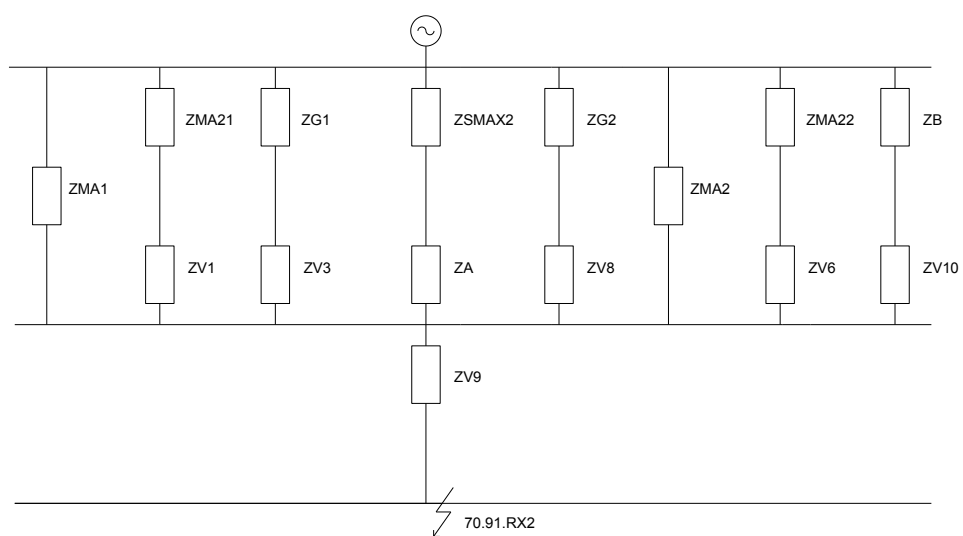
Tabulka 5.3.1 zkratky na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila

Zkrat na	Z_c	I_{k3}''	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,1615	39,32	681,05
40.12.RX1	0,1654	38,40	665,11
70.91.RX1	0,2043	31,09	538,48
Pila	0,2626	24,18	418,86

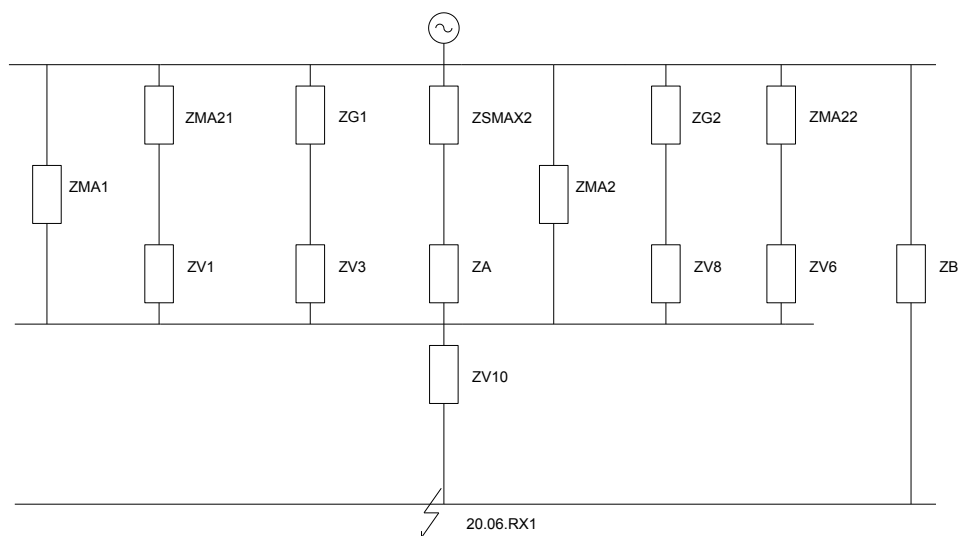
Zkraty na rozvodnách 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1:



Obr.38 Zkrat na rozvodně 40.12.RX2



Obr.39 Zkrat na rozvodně 70.91.RX2

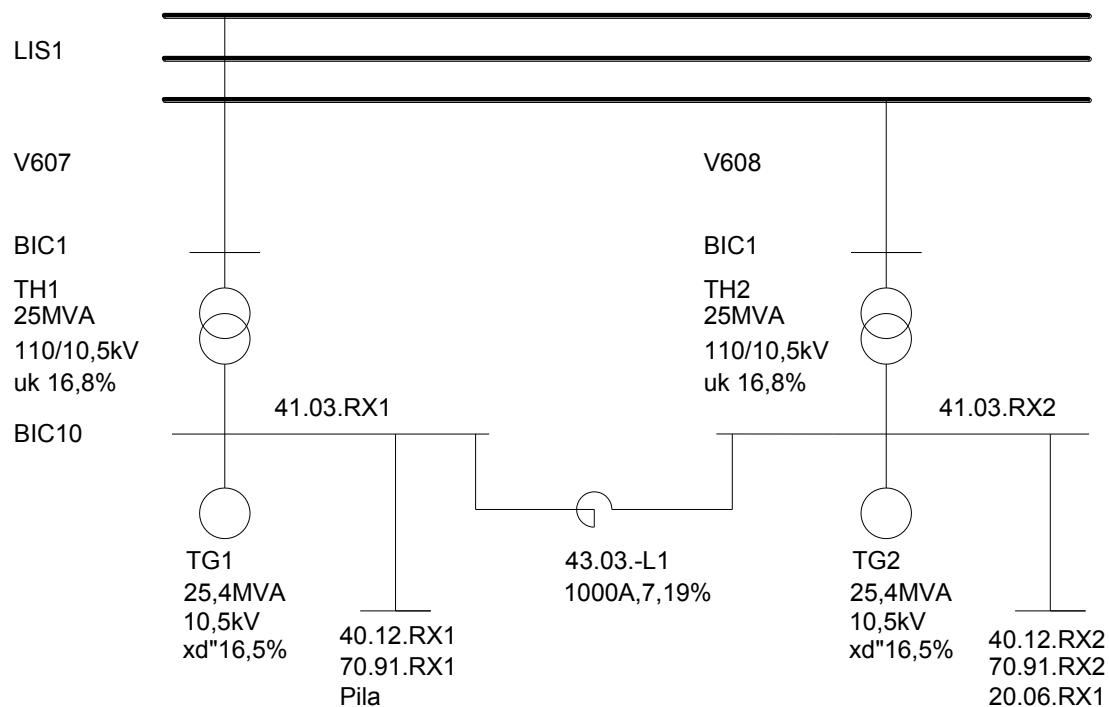


Obr.40 Zkrat na rozvodně 20.06.RX1

Tabulka 5.3.2 zkraty na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX2	0,1615	39,32	681,05
40.12.RX2	0,1654	38,40	665,11
70.91.RX2	0,2043	31,09	538,48
20.06.RX1	0,1961	32,38	560,80

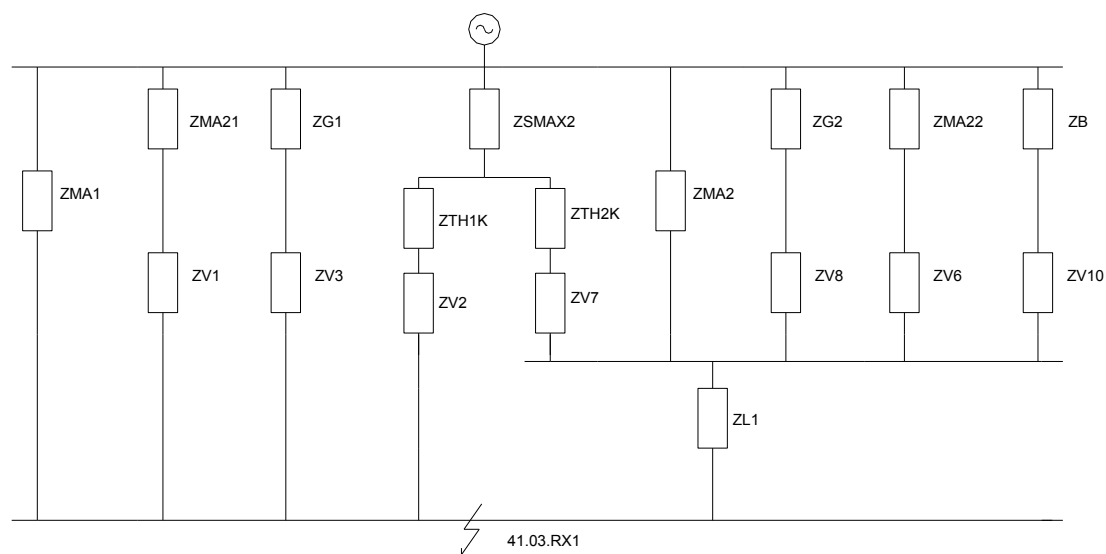
5.4 Varianta 3.MAX



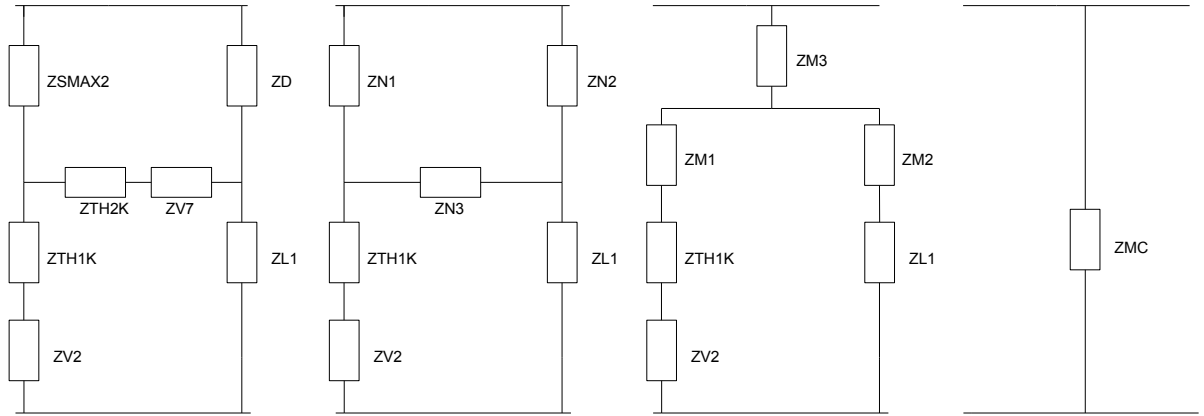
Obr. 41 Maximální zkrat varianta 3.

Na obrázku 41. je naznačeno schéma zapojení průmyslového podniku pro výpočet maximálních zkratových poměrů podle třetí varianty. V tomto případě zapojení je mezi hlavními rozvodnami průmyslového podniku (41.03.RX1, 41.03.RX2) zapojen reaktor L1 pro omezení zkratového proudu. Transformátory TH1 a TH2 napájejí hlavní rozvodny (41.03.RX1, 41.03.RX2), stejně jako u druhé varianty.

Zkraty na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila:



Obr. 42 Zkrat na rozvodně 41.03.RX1



Obr. 43 Postup zjednodušení celkové impedance Z_{MC}

$$Z_{N1} = Z_{SMAX2} = 0,03836 \, \Omega$$

$$Z_{N2} = Z_{D1} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{V8} + Z_{G2}} + \frac{1}{Z_{MA2}} + \frac{1}{Z_{V6} + Z_{MA22}} + \frac{1}{Z_{V10} + Z_B}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0,00279 + 0,6496} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,0396 + 15} + \frac{1}{0,03797 + 3,9978}} = 0,516 \, \Omega$$

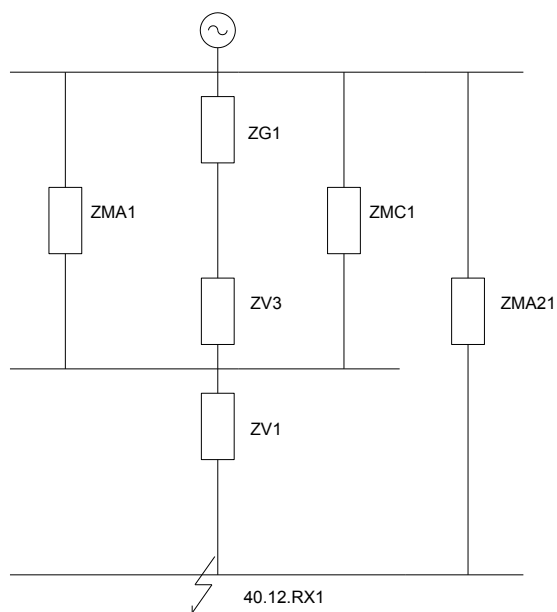
$$Z_{N3} = Z_{TH2K} + Z_{V7} = 0,703 + 0,0005 = 0,70350 \, \Omega$$

$$Z_{M1} = \frac{Z_{N1} \cdot Z_{N3}}{Z_{N1} + Z_{N2} + Z_{N3}} = \frac{0,03836 \cdot 0,7035}{0,03836 + 0,516 + 0,7035} = 0,0215 \, \Omega$$

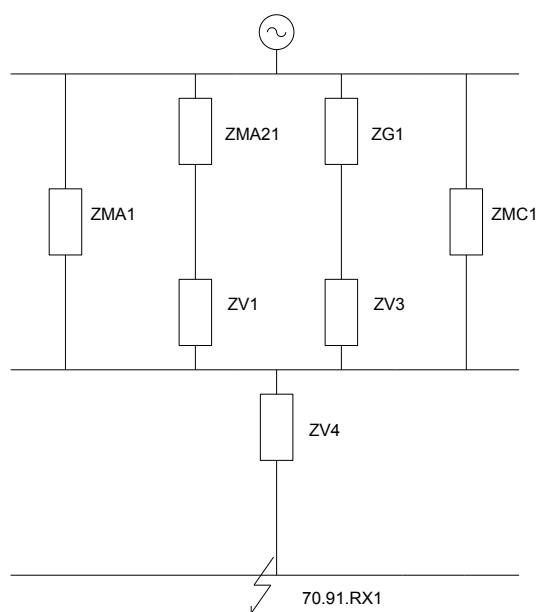
$$Z_{M2} = \frac{Z_{N2} \cdot Z_{N3}}{Z_{N1} + Z_{N2} + Z_{N3}} = \frac{0,516 \cdot 0,7035}{0,03836 + 0,516 + 0,7035} = 0,2886 \, \Omega$$

$$Z_{M3} = \frac{Z_{N1} \cdot Z_{N2}}{Z_{N1} + Z_{N2} + Z_{N3}} = \frac{0,03836 \cdot 0,516}{0,03836 + 0,516 + 0,7035} = 0,01574 \, \Omega$$

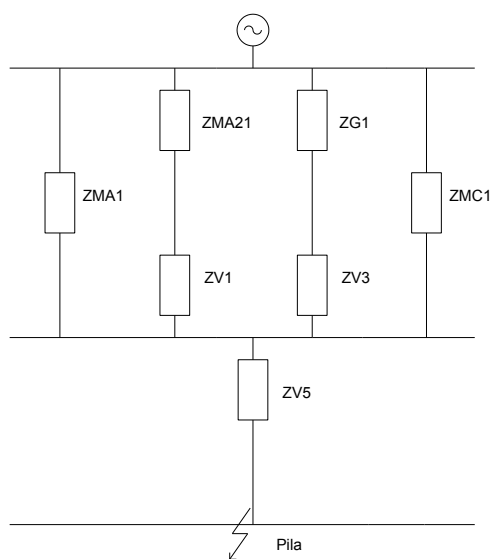
$$Z_{MC1} = Z_{M3} + \frac{1}{\frac{1}{Z_{M1} + Z_{TH1K} + Z_{V2}} + \frac{1}{Z_{M2} + Z_{L1}}} = 0,01577 + \frac{1}{\frac{1}{0,725} + \frac{1}{0,7037}} = 0,3728 \, \Omega$$



Obr. 44 Zkrat na rozvodně 40.12.RX1



Obr. 45 Zkrat na rozvodně 70.91.RX1



Obr. 46 Zkrat na rozvodně Pila

Zkrat na rozvodně 70.91.RX1 (příklad výpočtu)

Celková impedance:

$$Z_c = \frac{1}{\frac{1}{Z_{MA21} + Z_{V1}} + \frac{1}{Z_{MA1}} + \frac{1}{Z_{G1} + Z_{V3}} + \frac{1}{Z_{MC1}}} + Z_{V4} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{15 + 0,00396} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,6496 + 0,00279} + \frac{1}{0,3728}} + 0,04272 = 0,2714 \, \Omega$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0,2714} = 23,4 \, kA$$

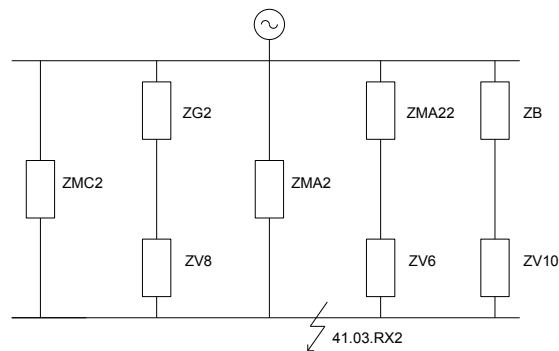
Počáteční souměrný rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu:

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 23,4 = 405,26 \, MVA$$

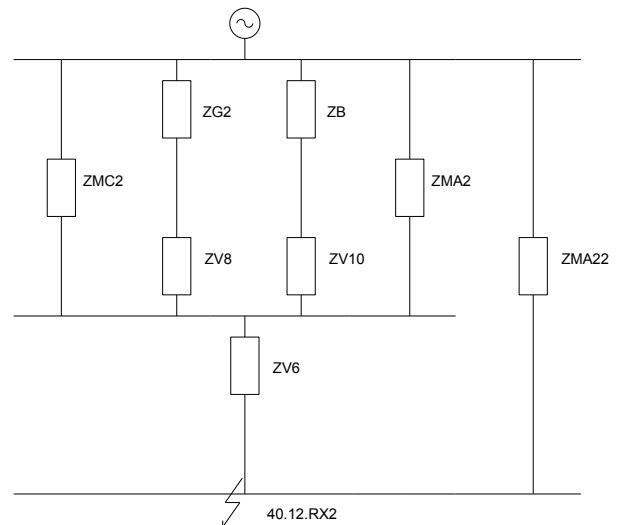
Tabulka 5.4.1 zkrat na rozvodnách (41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila)

Zkrat na	Z_c	I_{k3}''	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,2287	27,77	480,96
40.12.RX1	0,2325	27,31	473,03
70.91.RX1	0,2714	23,40	405,26
Pila	0,3298	19,26	333,52

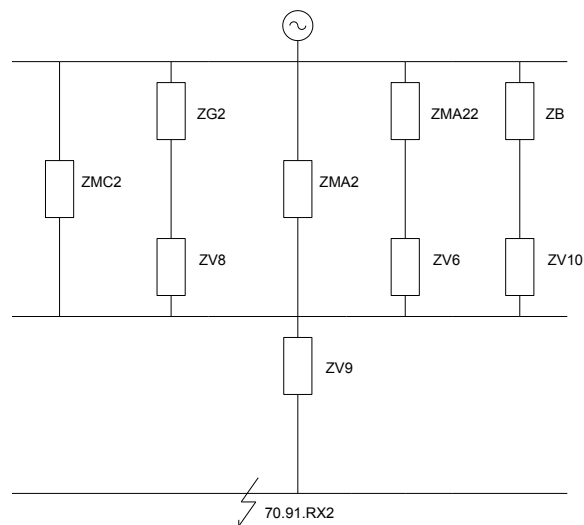
Zkratky na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1:



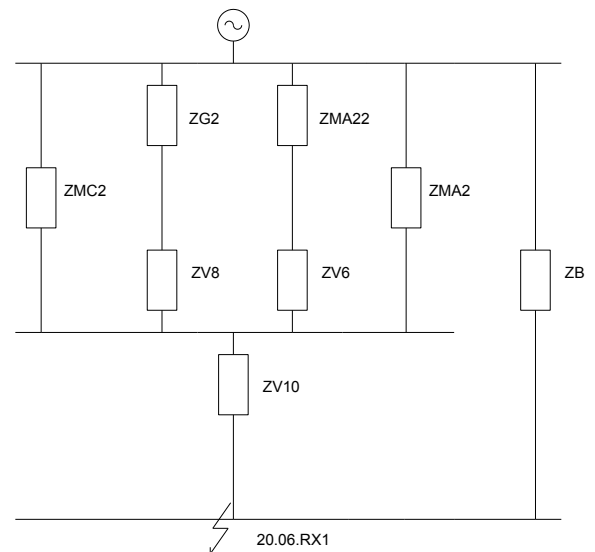
Obr. 47 Zkrat na rozvodně 41.03.RX2



Obr. 48 Zkrat na rozvodně 40.12.RX2



Obr. 49 Zkrat na rozvodně 70.91.RX2



Obr. 50 Zkrat na rozvodně 20.06.RX1

Tabulka 5.4.2 zkratky na rozvodnách (41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1)

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX2	0,2188	29,03	502,82
40.12.RX2	0,2226	28,53	494,15
70.91.RX2	0,2615	24,29	420,67
20.06.RX1	0,2523	25,17	436,02

LIS1

V607

BIC1

TH1
25MVA
110/10,5kV
uk 16,8%

41.03.RX1

BIC10

TG1
25,4MVA
10,5kV
xd"16,5%

40.12.RX1
70.91.RX1
Pila

41.03.RX2

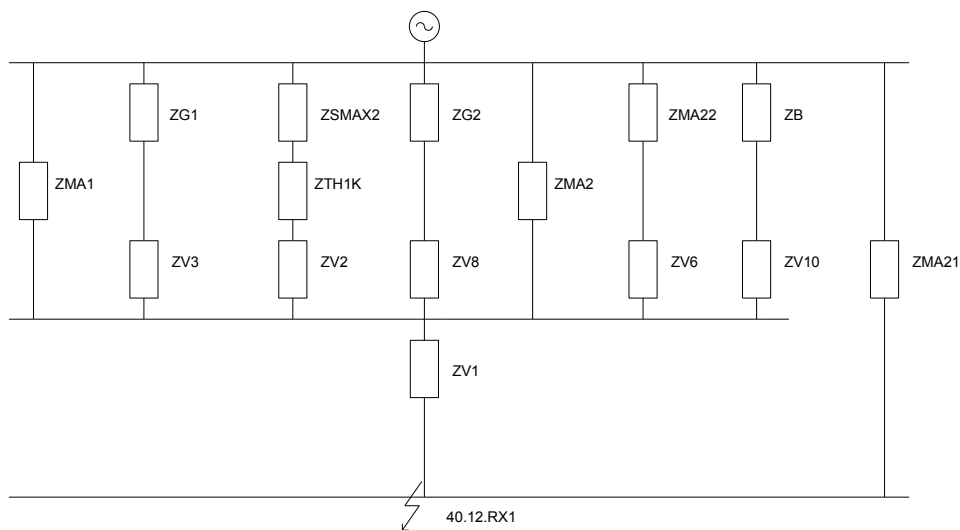
TG2
25,4MVA
10,5kV
xd"16,5%

40.12.RX2
70.91.RX2
20.06.RX1

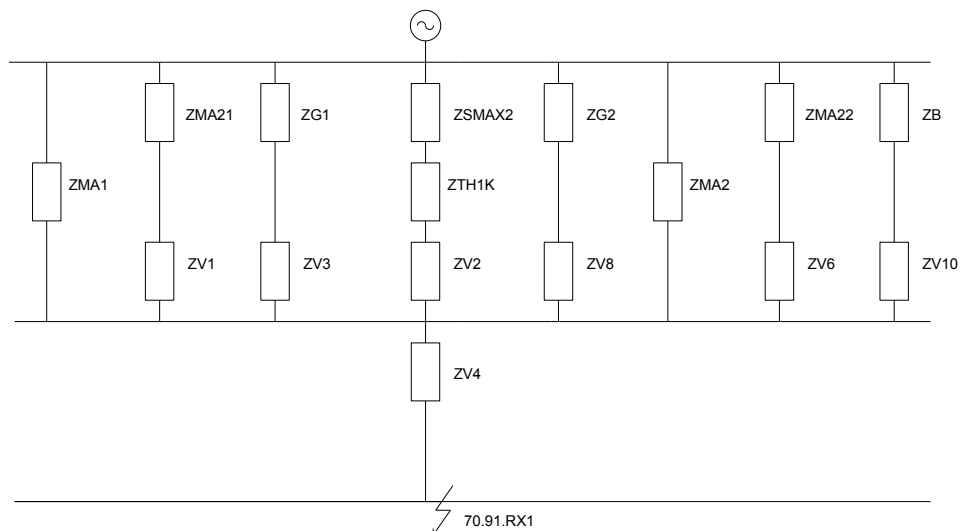
Na obrázku 51 je naznačeno schéma zapojení průmyslového podniku pro výpočet maximálních zkratových poměrů podle čtvrté varianty. Průmyslový podnik je napájen pouze jedním venkovním vedením (V607) 110kV z rozvodny Liskovec a transformátorem TH1. Podélný spínač přípojníc mezi hlavními rozvodnami průmyslového podniku (41.03.RX1, 41.03.RX2) je sepnut.

41.03.RX1, 41.03.RX2

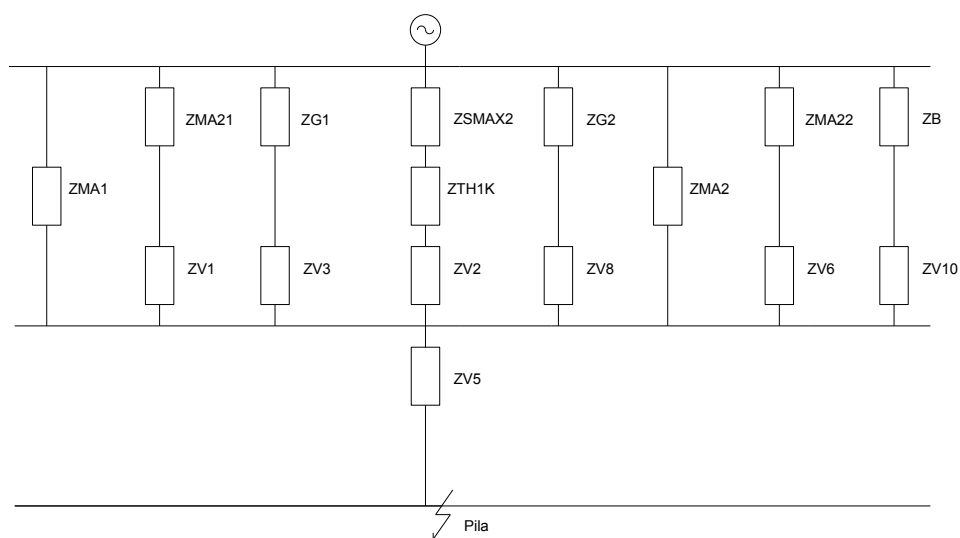
43



Obr. 53 Zkrat na rozvodně 40.12.RX1



Obr. 54 Zkrat na rozvodně 70.91.RX1



Obr. 55 Zkrat na rozvodně Pila

Zkrat na rozvodně Pila (příklad výpočtu):

Náhradní impedance Z_R :

$$\begin{aligned}
 Z_R &= \frac{1}{Z_{MA1}} + \frac{1}{Z_{V1} + Z_{MA21}} + \frac{1}{Z_{V3} + Z_{G1}} + \frac{1}{Z_{V2} + Z_{TH1K} + Z_{SMA2}} + \frac{1}{Z_{V8} + Z_{G2}} + \frac{1}{Z_{MA2}} + \\
 &+ \frac{1}{Z_{V6} + Z_{MA22}} + \frac{1}{Z_{V10} + Z_B} = \\
 &= \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,00396 + 15} + \frac{1}{0,00279 + 0,6496} + \frac{1}{0,0005 + 0,703 + 0,03836} + \\
 &+ \frac{1}{0,00279 + 0,6496} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,00396 + 15} + \frac{1}{0,03797 + 3,99784} = 4,7859 \, \Omega
 \end{aligned}$$

Celková impedance:

$$Z_c = \left(\frac{1}{Z_R} \right) + Z_{V5} = \left(\frac{1}{4,9759} \right) + 0,1011 = 0,3021 \, \Omega$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0,3021} = 21,02 \, kA$$

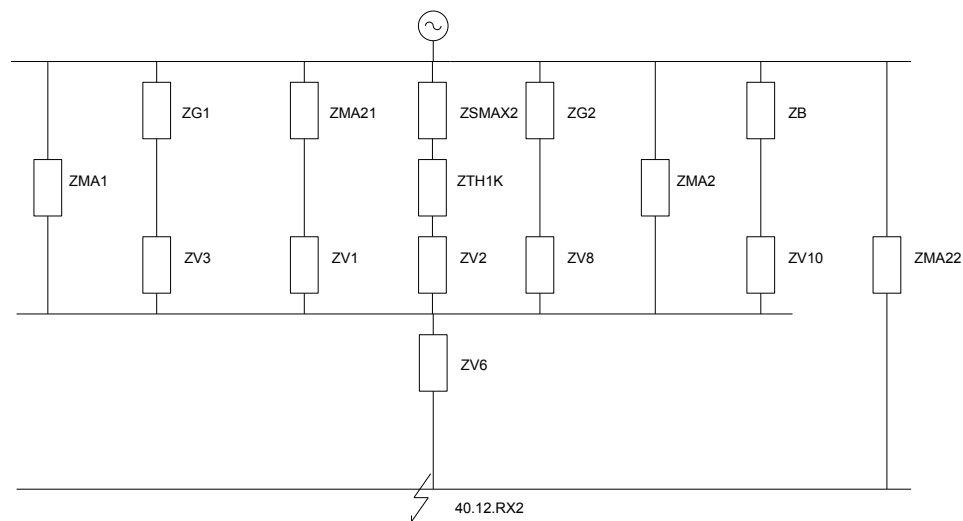
Počáteční souměrný rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu:

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 21,02 = 364,15 \, MVA$$

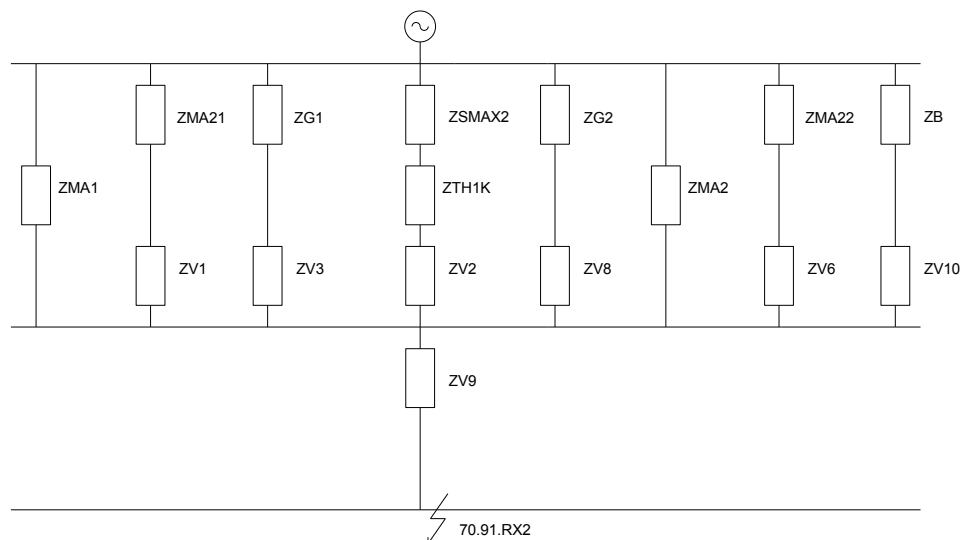
Tabulka 5.5.1 zkraty na rozvodnách (41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila)

Zkrat na	Z_c	I_{k3}''	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,2010	31,60	547,35
40.12.RX1	0,2048	31,01	537,07
70.91.RX1	0,2437	26,06	451,40
Pila	0,3021	21,02	364,15

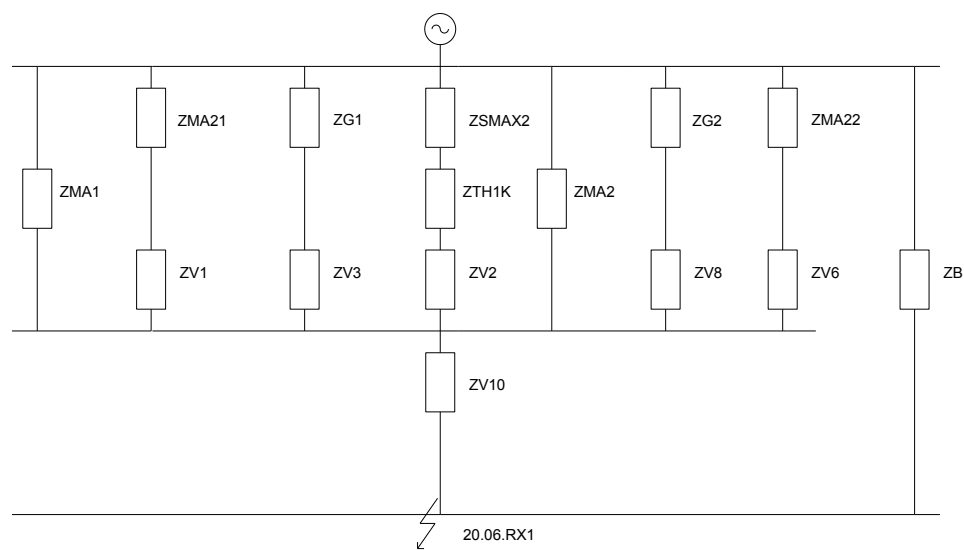
Zkrat na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1:



Obr. 56 Zkrat na rozvodně 40.12.RX2



Obr. 57 Zkrat na rozvodně 70.91.RX2

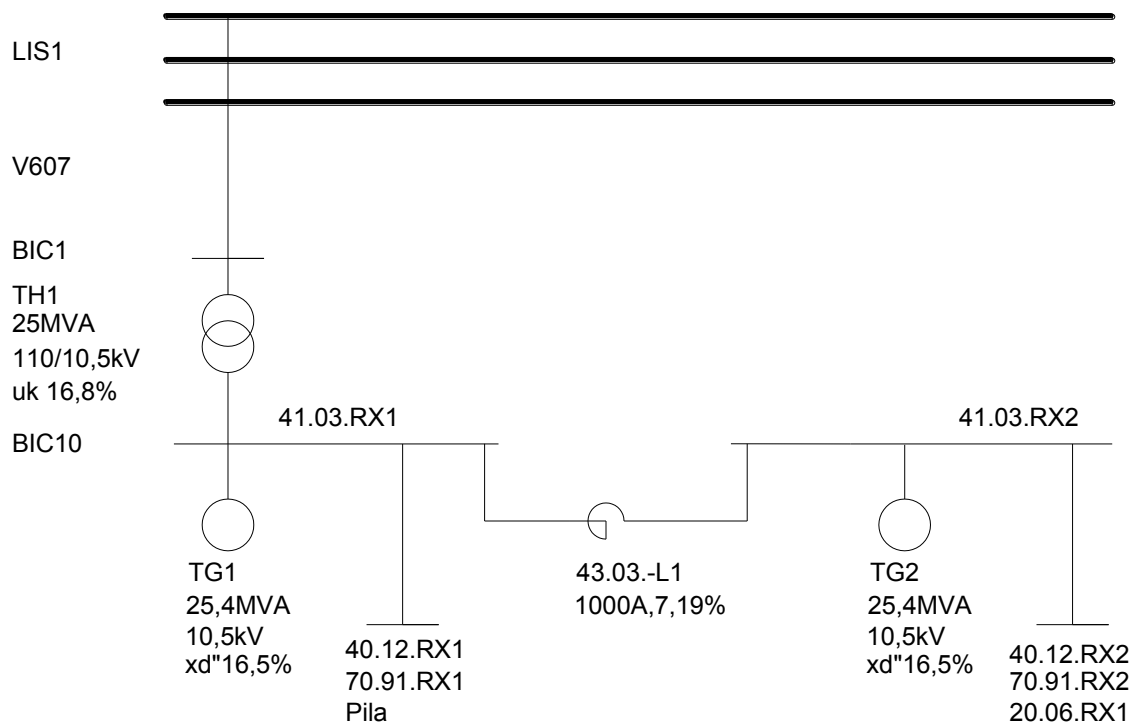


Obr. 58 Zkrat na rozvodně 20.06.RX1

Tabulka 5.5.2 zkraty na rozvodnách (41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1)

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX2	0,2010	31,60	547,35
40.12.RX2	0,2048	31,01	537,07
70.91.RX2	0,2437	26,06	451,40
20.06.RX1	0,2348	27,05	468,44

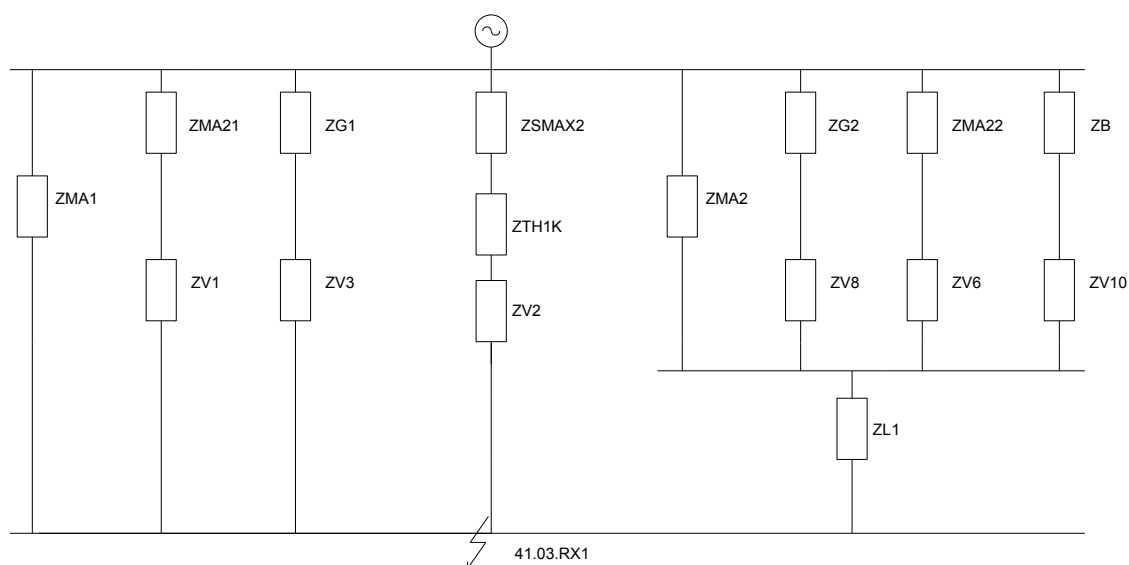
5.6 Varianta 5a.MAX



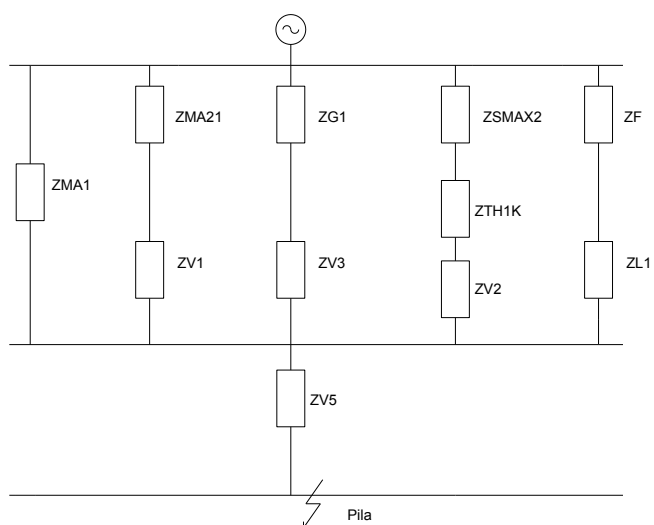
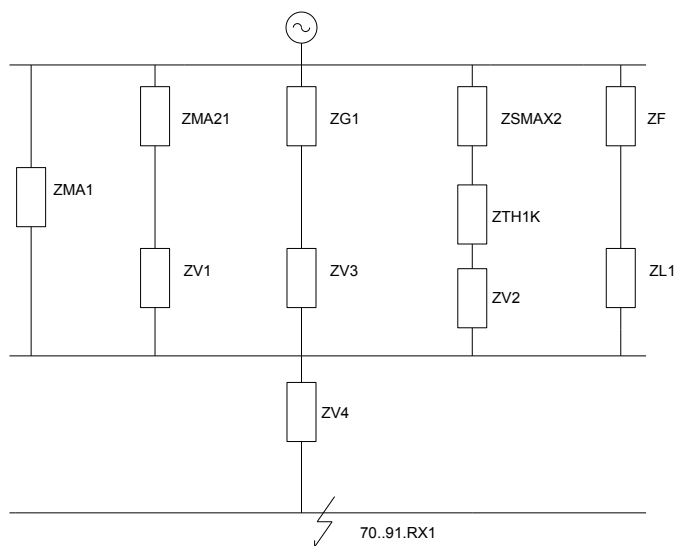
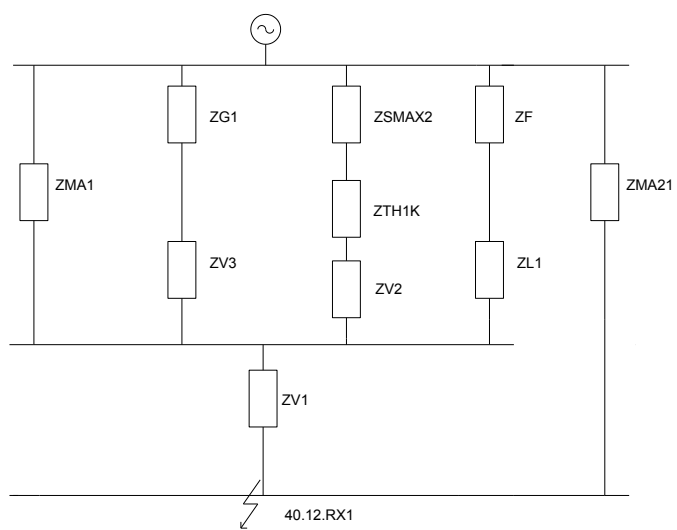
Obr. 59 Maximální zkrat varianta 5a.

Při této variantě zapojení je průmyslový podnik napájen pouze jedním nadzemním vedením V 607 (110 kV) z rozvodny Lískovec a transformátorem TH1. Mezi hlavními rozvodnami (41.03.RX1, 41.03.RX2) průmyslového podniku je umístěn reaktor L1 pro omezení zkratových proudů. Schéma zapojení je naznačeno na obrázku 59.

Zkraty na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila:



Obr. 60 Zkrat na rozvodně 41.03.RX1



Zkrat na rozvodně Pila (příklad výpočtu):

Náhradní impedance Z_F

$$Z_F = \frac{1}{\frac{1}{Z_{V8} + Z_{G2}} + \frac{1}{Z_{MA2}} + \frac{1}{Z_{V6} + Z_{MA22}} + \frac{1}{Z_{V10} + Z_B}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0,00279 + 0,6496} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,0396 + 15} + \frac{1}{0,03797 + 3,9978}} = 0,516 \, \Omega$$

Celková impedance:

$$Z_C = Z_{V5} + \frac{1}{\frac{1}{Z_{V1} + Z_{MA21}} + \frac{1}{Z_{MA1}} + \frac{1}{Z_{V3} + Z_{G1}} + \frac{1}{Z_{V2} + Z_{TH1K} + Z_{SMA2}} + \frac{1}{Z_{F1} + Z_{L1}}} =$$

$$= 0,10110 + \frac{1}{\frac{1}{0,00396 + 15} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,00279 + 0,6496} + \frac{1}{0,0005 + 0,703 + 0,03836} + \frac{1}{0,516 + 0,4151}} =$$

$$= 0,3443 \, \Omega$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0,3443} = 18,45 \, kA$$

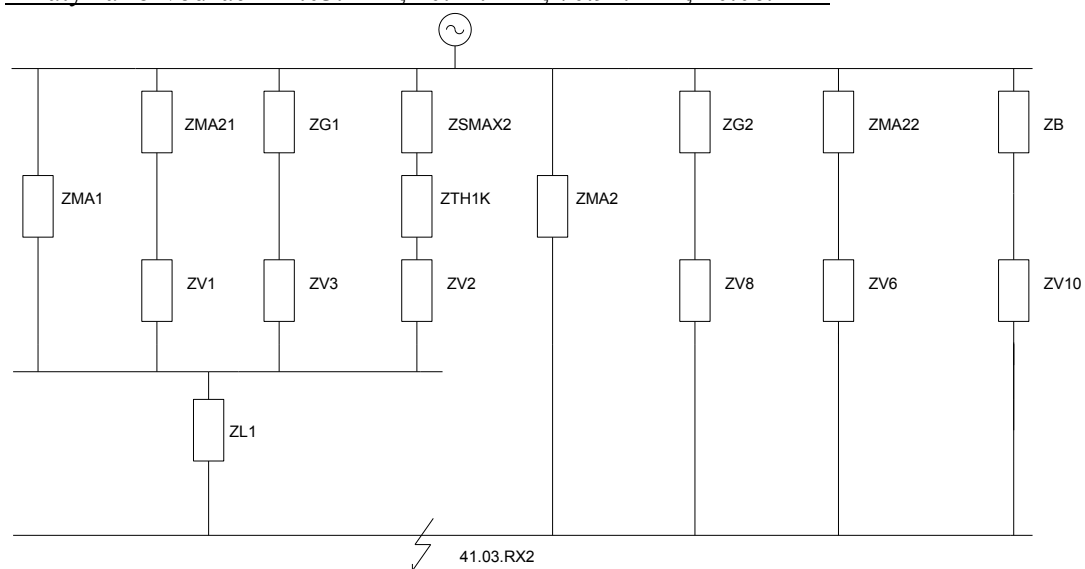
Počáteční souměrný rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu:

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 18,45 = 319,50 \, MVA$$

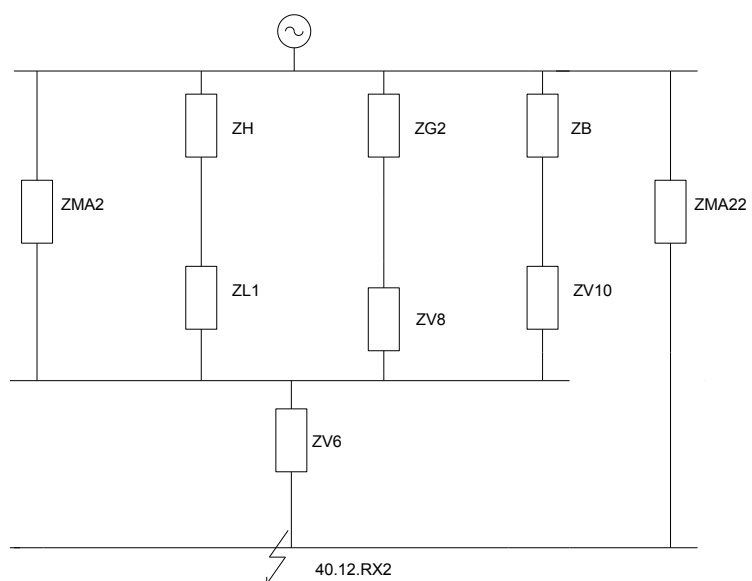
Tabulka 5.6.1 zkraty na rozvodnách (41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila)

Zkrat na	Z_c	I_{k3}''	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,2432	26,11	452,32
40.12.RX1	0,2470	25,71	445,31
70.91.RX1	0,2859	22,21	384,74
Pila	0,3443	18,45	319,50

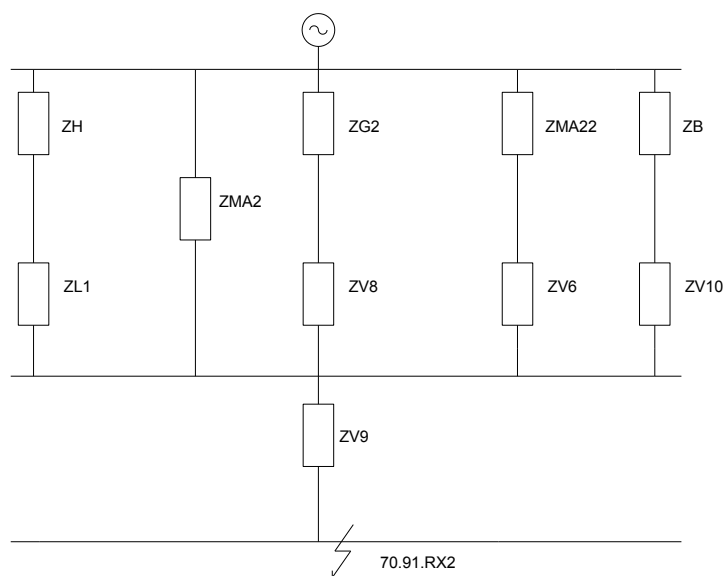
Zkrat na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1



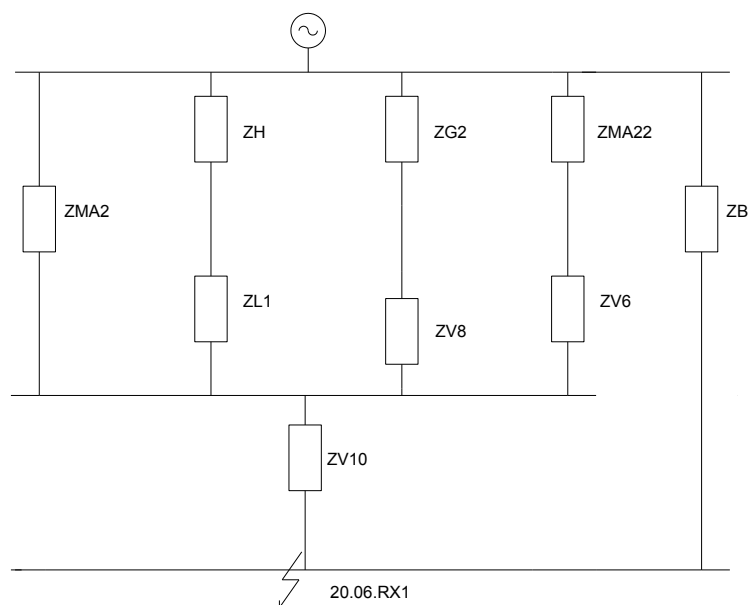
Obr. 64 Zkrat na rozvodně 41.03.RX2



Obr. 65 Zkrat na rozvodně 40.12.RX2



Obr. 66 Zkrat na rozvodně 70.91.RX2

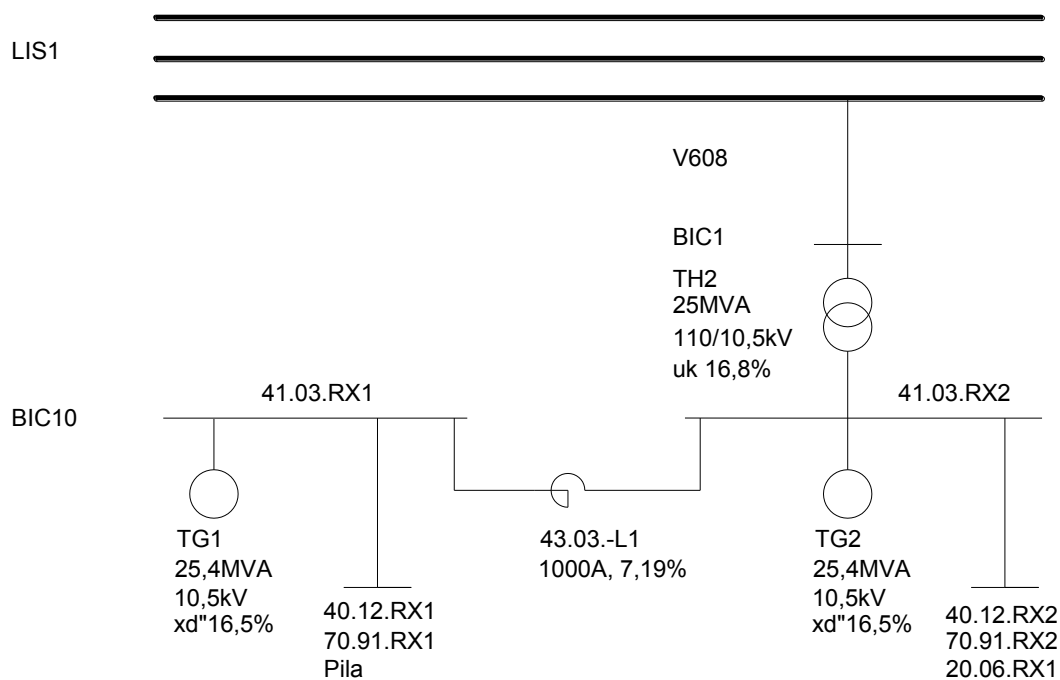


Obr. 67 Zkrat na rozvodně 20.06.RX1

Tabulka 5.6.2 zkraty na rozvodnách (41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1)

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX2	0,3047	20,84	360,96
40.12.RX2	0,3085	20,58	356,52
70.91.RX2	0,3475	18,28	316,58
20.06.RX1	0,3366	18,86	326,75

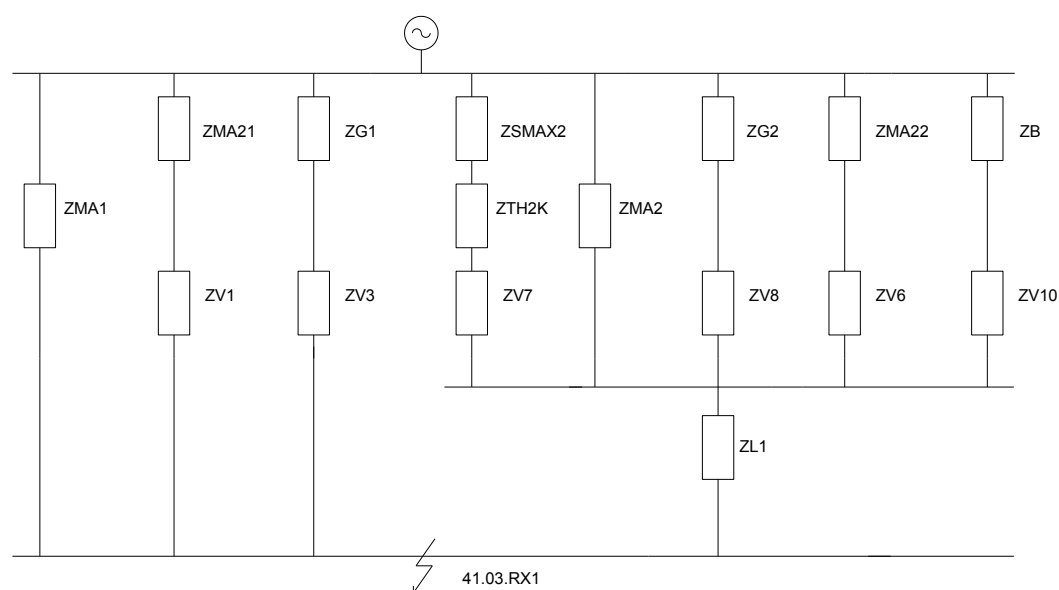
5.7 Varianta 5b.MAX



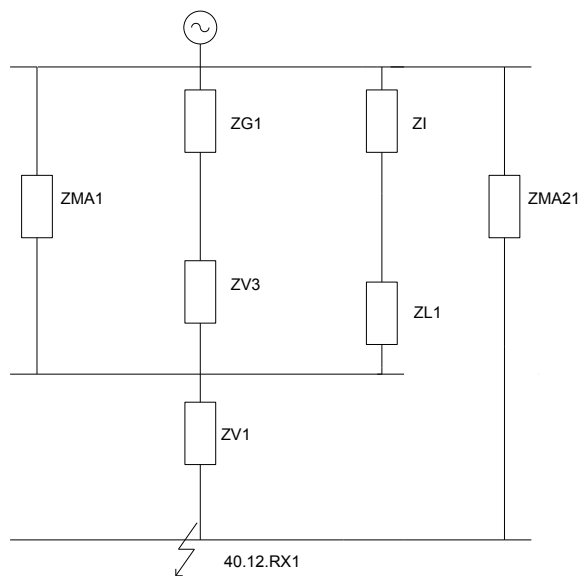
Obr. 68 Maximální zkrat varianta 5b.

V tomto případě je průmyslový podnik napájen pouze jedním nadzemním vedením V608 (110 kV) z rozvodny Lískovec. Vedení je připojeno na transformátor TH2 který napájí hlavní rozvodnu průmyslového podniku (41.03.RX2). Druhá hlavní rozvodna (41.03.RX1) je připojena k rozvodně (41.03.RX2) prostřednictvím reaktoru L1 který je určen k omezení zkratového proudu. Na hlavní rozvodnu jsou připojeny oba generátory (TG1, TG2).

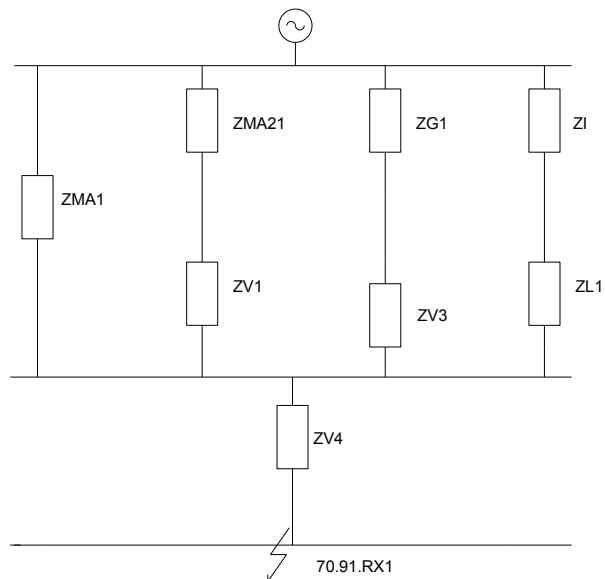
Zkraty na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila



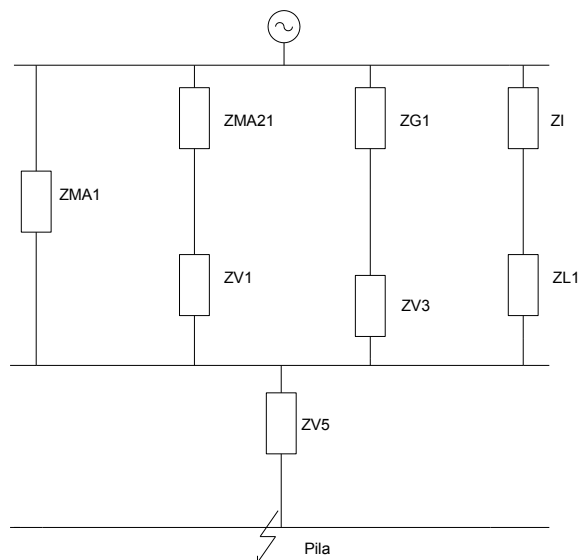
Obr. 69 Zkrat na rozvodně 41.03.RX1



Obr. 70 Zkrat na rozvodně 40.12.RX1



Obr. 71 Zkrat na rozvodně 70.91.RX1

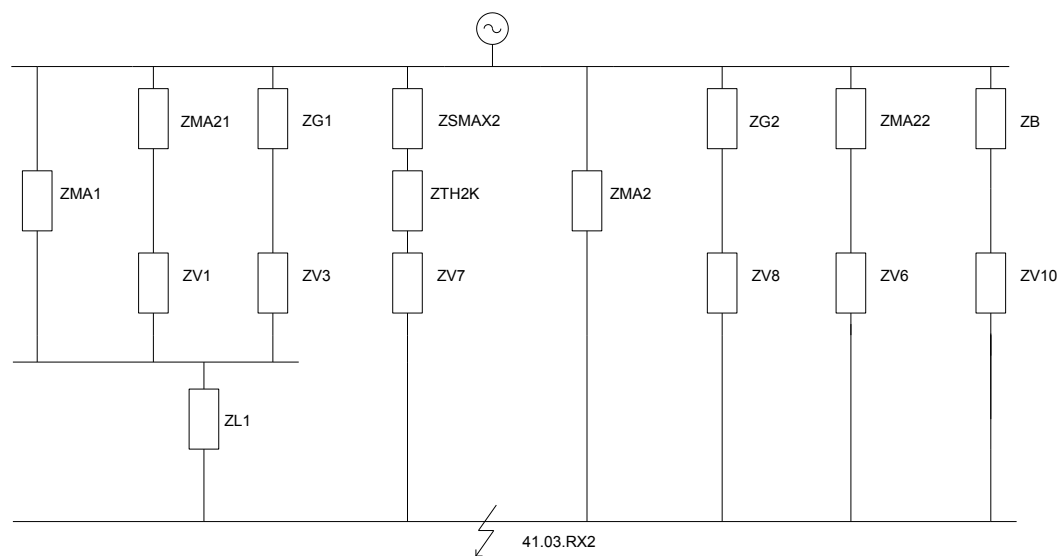


Obr. 72 Zkrat na rozvodně Pila

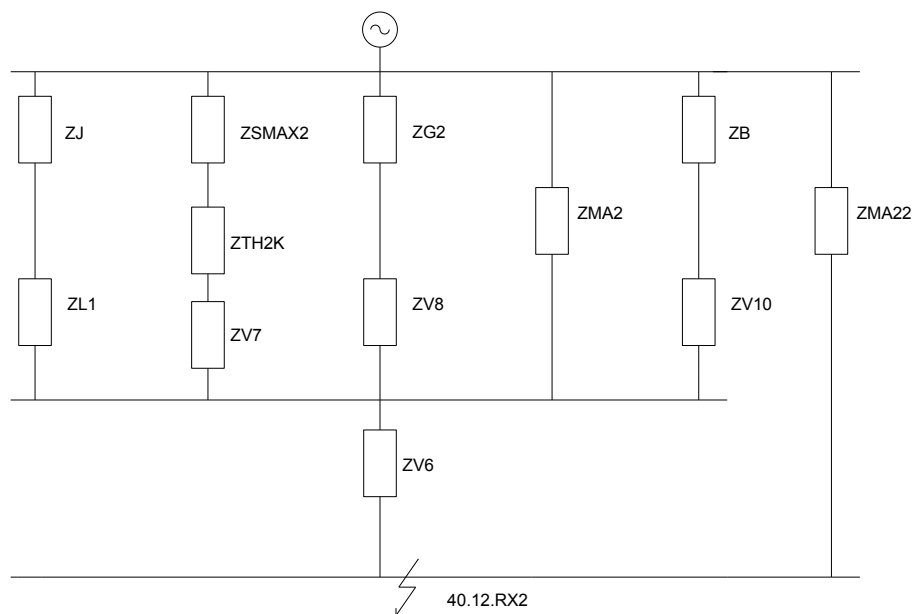
Tabulka 5.7.1 zkraty na rozvodnách (41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila)

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,3247	19,56	338,81
40.12.RX1	0,3285	19,34	334,90
70.91.RX1	0,3674	17,29	299,41
Pila	0,4258	14,92	258,35

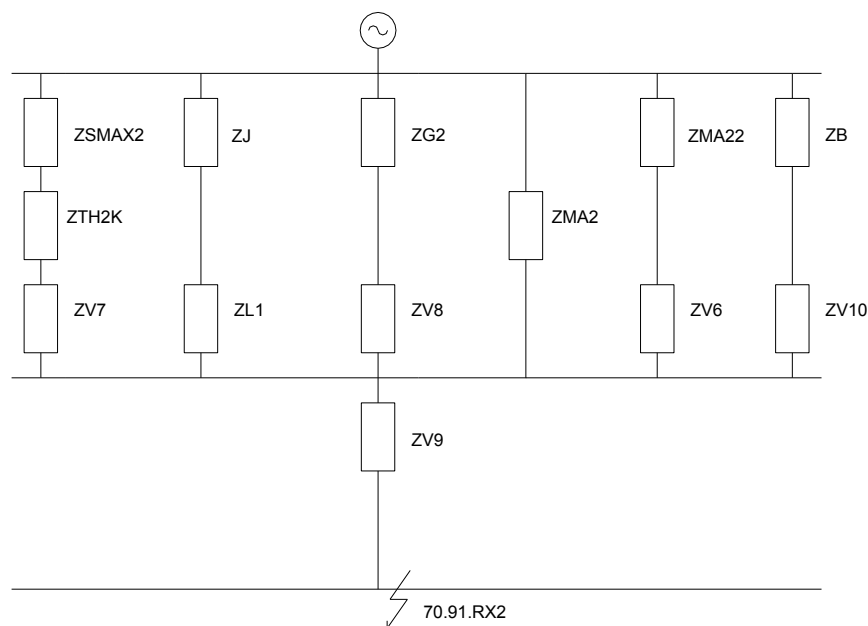
Zkrat na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1



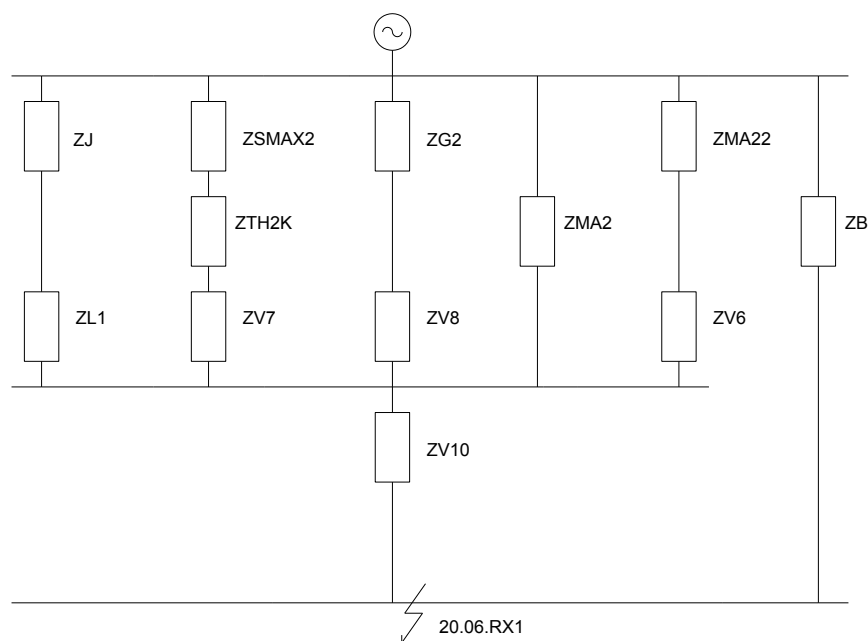
Obr. 73 Zkrat na rozvodně 41.03.RX2



Obr. 74 Zkrat na rozvodně 40.12.RX2



Obr. 75 Zkrat na rozvodně 70.91.RX2



Obr. 76 Zkrat na rozvodně 20.06.RX1

Tabulka 5.7.2 zkrat na rozvodnách (41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1)

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX2	0,2337	27,18	470,70
40.12.RX2	0,2375	26,74	463,11
70.91.RX2	0,2764	22,98	397,95
20.06.RX1	0,2669	23,79	412,09

Zkrat na rozvodně 20.06.RX1 (příklad výpočtu):

Náhradní impedance Z_J

$$Z_J = \frac{1}{\frac{1}{(Z_{v1} + Z_{MA21})} + \frac{1}{(Z_{MA1})} + \frac{1}{(Z_{v3} + Z_{G1})}} = \frac{1}{\frac{1}{(0,00396 + 15)} + \frac{1}{(11,0345)} + \frac{1}{(0,00279 + 0,6496)}} =$$

$$= 0,5917 \, \Omega$$

Náhradní impedance Z_u

$$Z_u = \frac{1}{\frac{1}{Z_{L1} + Z_J} + \frac{1}{Z_{V7} + Z_{TH2K} + Z_{SMA2}} + \frac{1}{Z_{MA2}} + \frac{1}{Z_{V8} + Z_{G2}} + \frac{1}{Z_{V6} + Z_{MA22}}} =$$

$$\frac{1}{\frac{1}{0,4151 + 0,5917} + \frac{1}{0,0005 + 0,703 + 0,03836} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,00279 + 0,6496} + \frac{1}{0,00396 + 15}} =$$

$$= 0,24806 \, \Omega$$

Celková impedance:

$$Z_C = \frac{1}{\frac{1}{Z_B} + \frac{1}{(Z_U + Z_{V10})}} = \frac{1}{\frac{1}{3,9978} + \left(\frac{1}{0,24806 + 0,03797} \right)} = 0,2669 \, \Omega$$

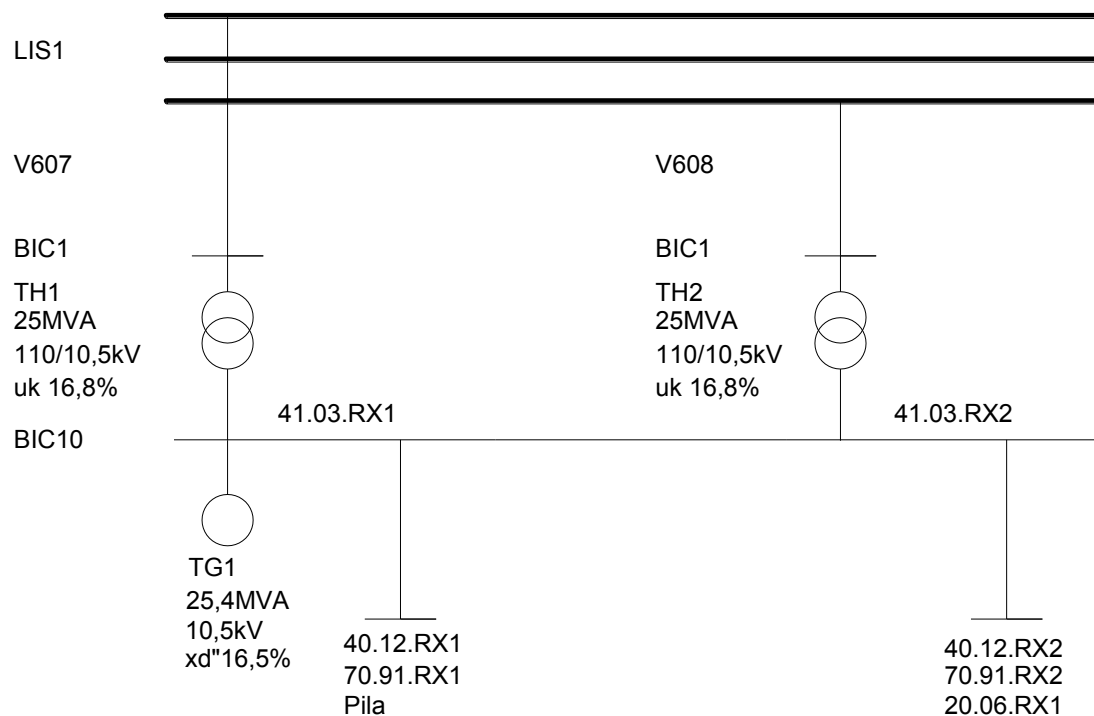
Maximální počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0,2669} = 23,79 \, kA$$

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu:

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 23,79 = 412,09 \, MVA$$

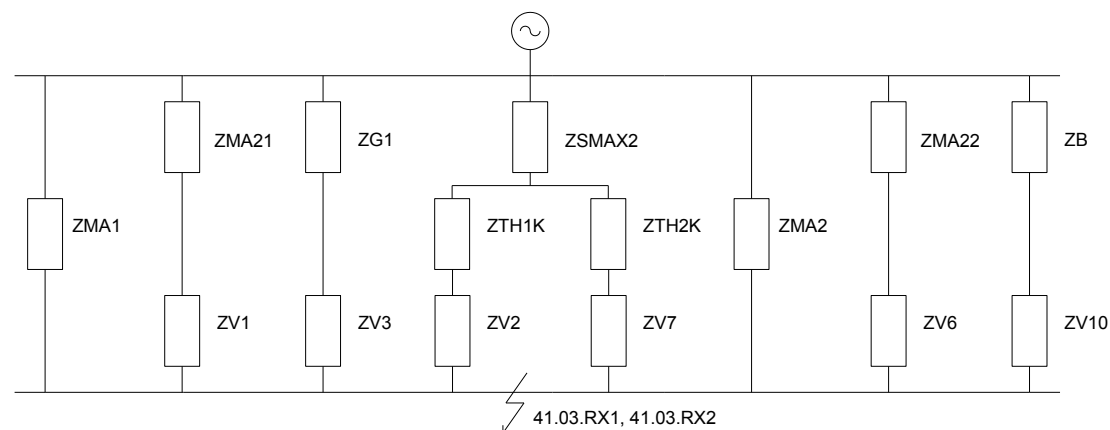
5.8 Varianta 6. MAX



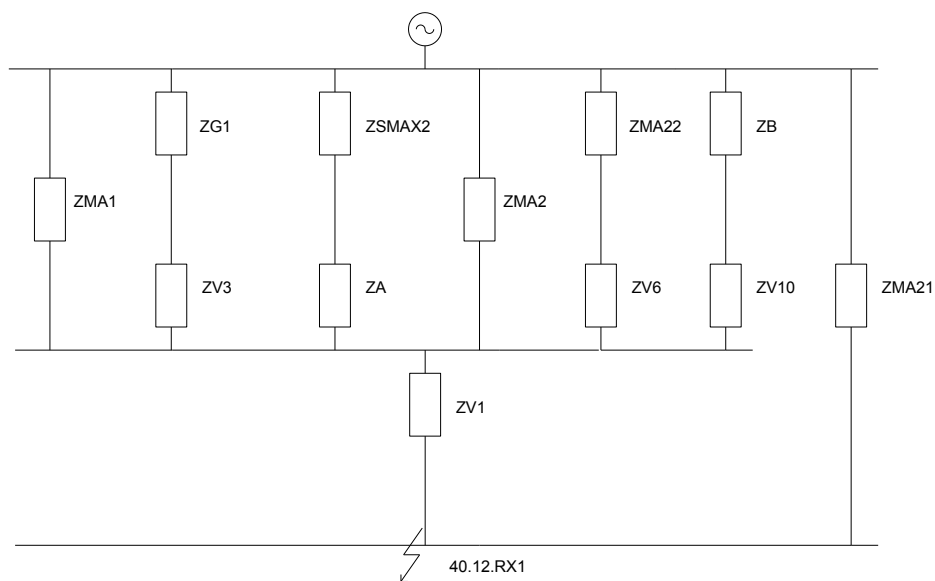
Obr. 77 Maximální zkrat varianta 6.

Varianta zapojení šest pro výpočet maximálních zkratových poměrů je zapojena stejně jako varianta dvě až na nepřipojený generátor TG2 na hlavní rozvodně průmyslového podniku 41.03.RX2 (jak je naznačeno na obrázku 77). Napájení průmyslového podniku je realizováno dvěma nadzemními vedeními V607 a V608 110 kV z rozvodny Lískovec a poté transformováno na hladinu 10 kV. Podélný spínač přípojníc mezi hlavními rozvodnami průmyslového podniku 41.03.RX1 a 41.03.RX2 je sepnut.

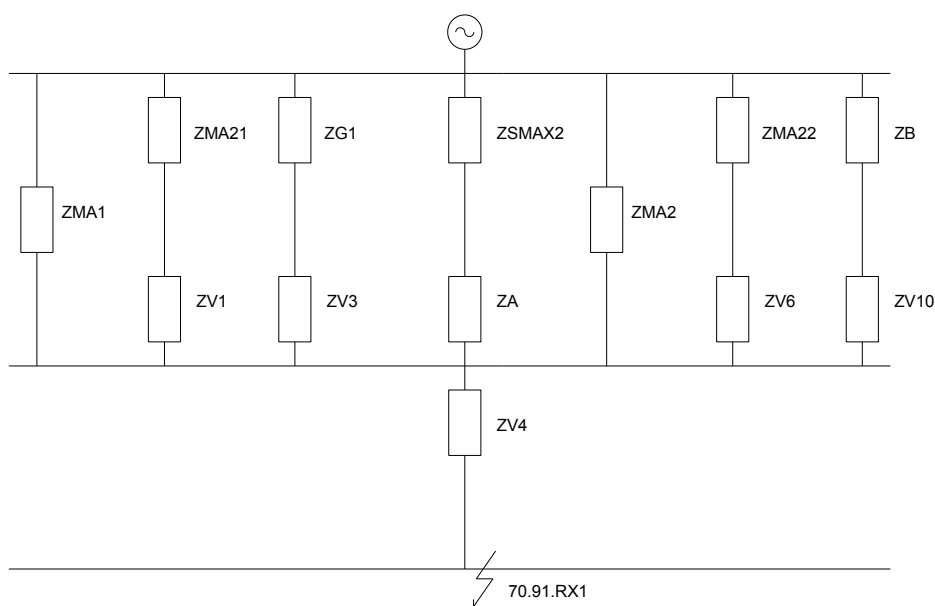
Zkraty na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila



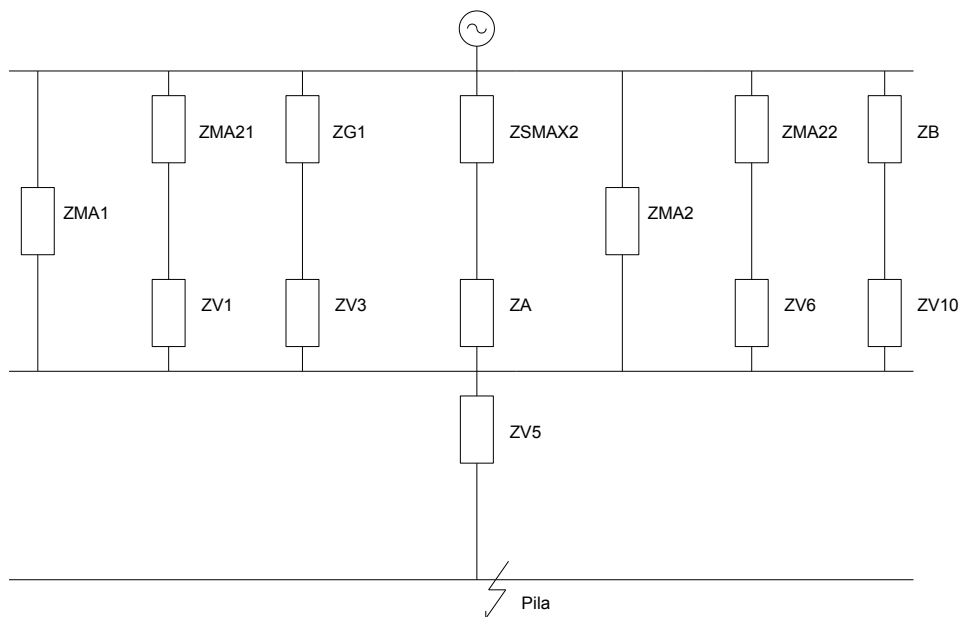
Obr. 78 Zkrat na rozvodně 41.03.RX1, 41.03.RX2



Obr. 79 Zkrat na rozvodně 40.12.RX1



Obr. 80 Zkrat na rozvodně 70.91.RX1

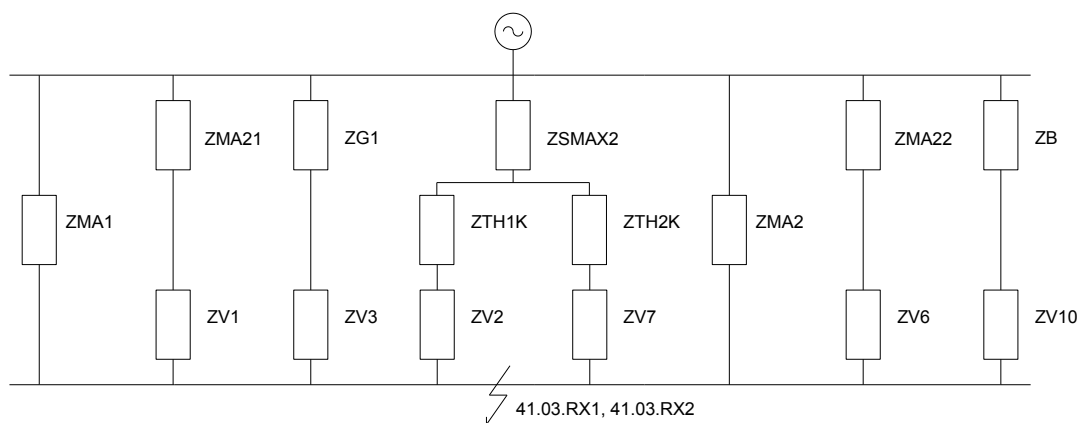


Obr. 81 Zkrat na rozvodně Pila

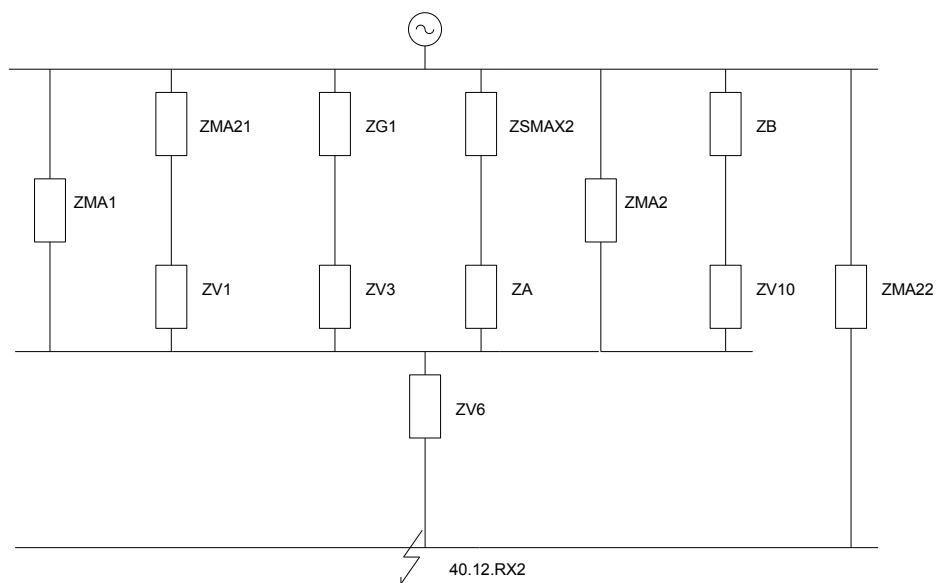
Tabulka 5.8.1 zkrat na rozvodnách (41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila)

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,2147	29,59	512,44
40.12.RX1	0,2185	29,07	503,43
70.91.RX1	0,2574	24,68	427,38
Pila	0,3158	20,11	348,36

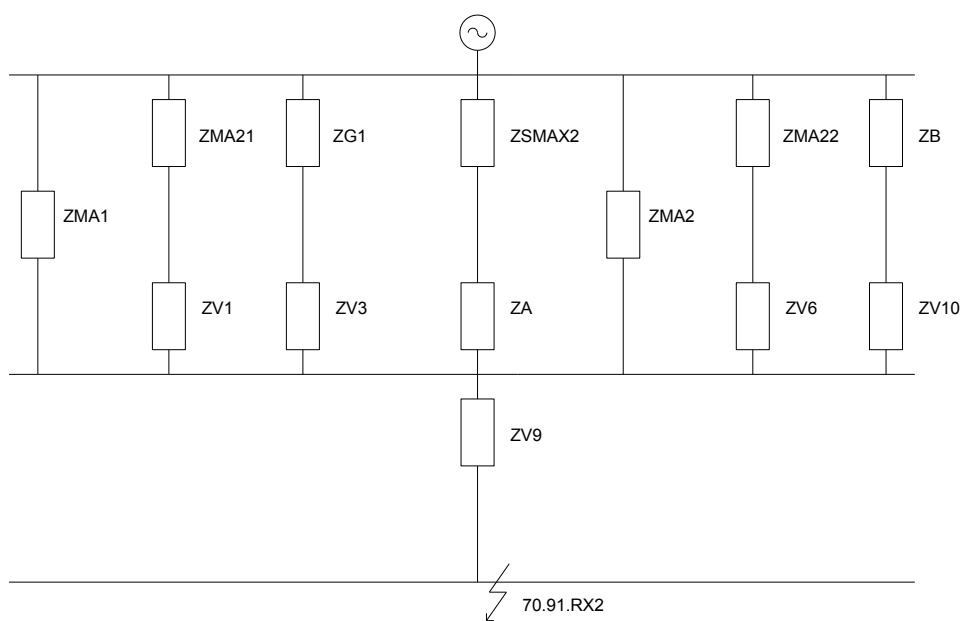
Zkrat na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1



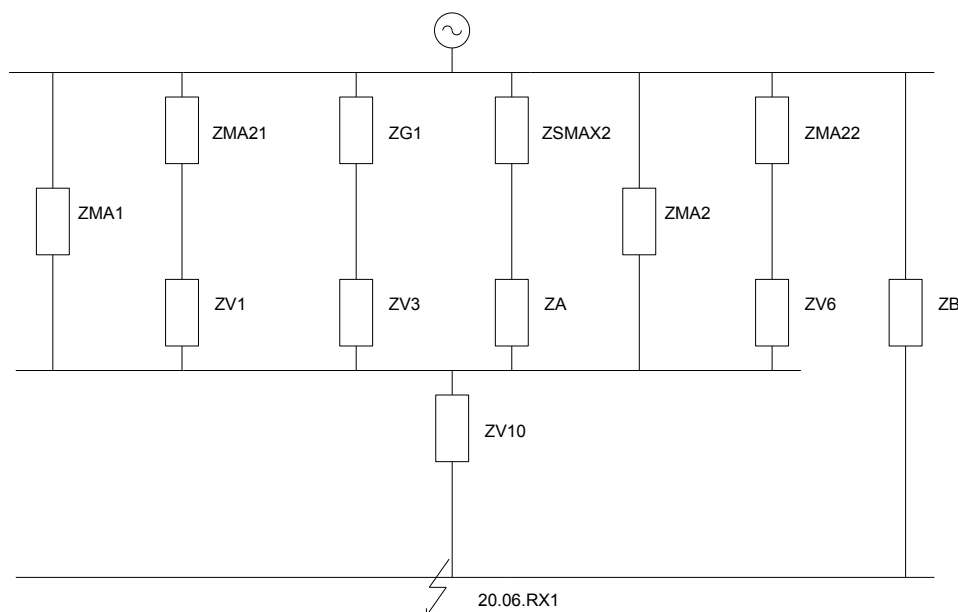
Obr. 82 Zkrat na rozvodně 41.03.RX2



Obr. 83 Zkrat na rozvodně 40.12.RX2



Obr. 84 Zkrat na rozvodně 70.91.RX2



Obr. 85 Zkrat na rozvodně 20.06.RX1

Zkrat na rozvodně 70.91.RX2 (příklad výpočtu):

Náhradní impedance Z_A

$$Z_A = \frac{1}{\frac{1}{Z_{V2} + Z_{TH1K}} + \frac{1}{Z_{TH2K} + Z_{V7}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,0005 + 0,703} + \frac{1}{0,0005 + 0,703}} = 0,35175 \, \Omega$$

Náhradní impedance Z_Y

$$\begin{aligned} Z_T &= \frac{1}{Z_{V1} + Z_{MA21}} + \frac{1}{Z_{MA1}} + \frac{1}{Z_{V3} + Z_{G1}} + \frac{1}{Z_A + Z_{SMA2}} + \frac{1}{Z_{MA2}} + \frac{1}{Z_{V6} + Z_{MA22}} + \frac{1}{Z_{V10} + Z_B} = \\ &= \frac{1}{0,00396 + 15} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,00279 + 0,6496} + \frac{1}{0,35175 + 0,03836} + \frac{1}{11,0345} + \\ &+ \frac{1}{0,00396 + 15} + \frac{1}{0,03797 + 3,99784} = 4,65687 \, \Omega \end{aligned}$$

Celková impedance:

$$Z_C = Z_{V9} + \frac{1}{Z_T} = 0,04272 + \frac{1}{4,65687} = 0,2574 \, \Omega$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0,2574} = 24,68 \text{ kA}$$

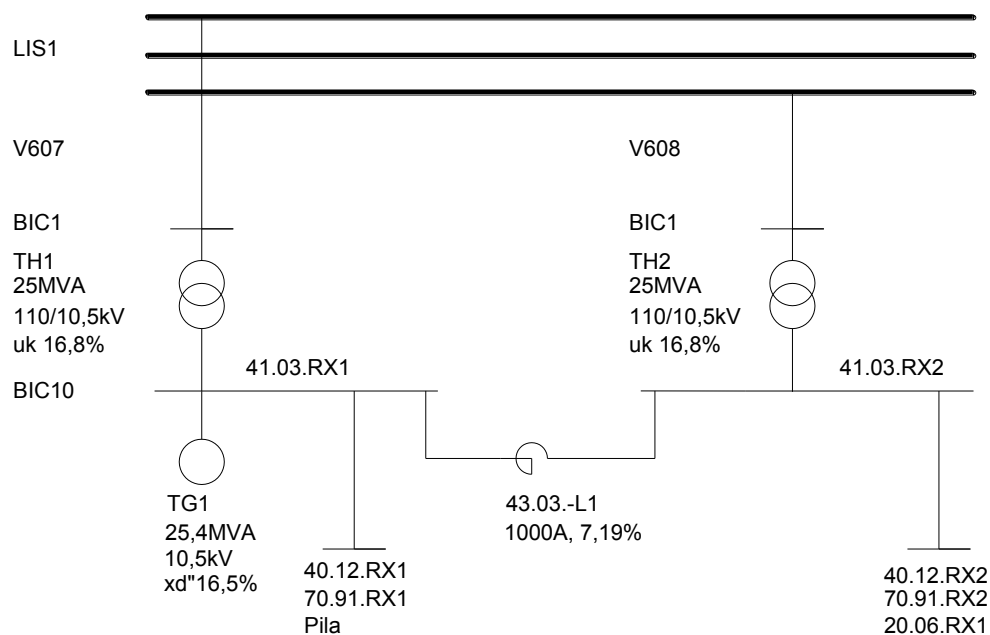
Počáteční souměrný rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu:

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 24,68 = 427,38 \text{ MVA}$$

Tabulka 5.8.2 zkraty na rozvodnách (41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1)

Zkrat na	Z_c	I_{k3}''	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX2	0,2147	29,59	512,44
40.12.RX2	0,2185	29,07	503,43
70.91.RX2	0,2574	24,68	427,38
20.06.RX1	0,2483	25,58	443,09

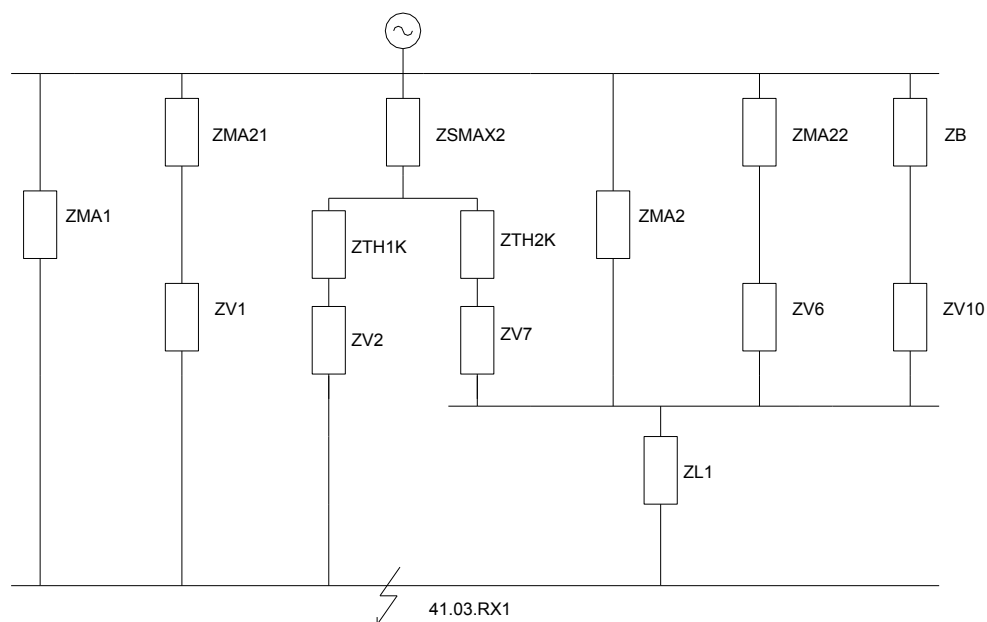
5.9 Varianta 7a. MAX



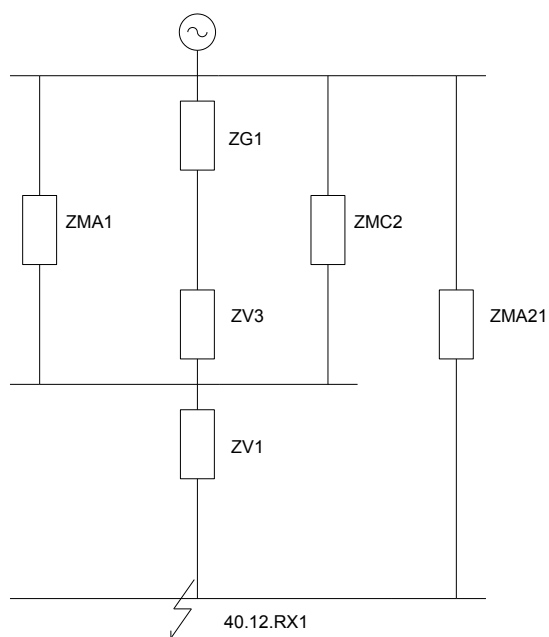
Obr. 86 Maximální zkrat varianta 7a.

V této variantě zapojení je průmyslový podnik napájen dvěma nadzemními vedeními V607 a V608 110 kV z rozvodny Lískovec a dále pak prostřednictvím dvojice transformátorů TH1 a TH2, které jsou svými sekundárními vinutími připojeny na hlavní rozvodnu průmyslového podniku 41.03.RX1 a 41.03.RX2. Mezi těmito rozvodnami je připojen reaktor pro omezení zkratového proudu L1. Na rozvodně 41.03.RX2 není připojen generátor TG2.

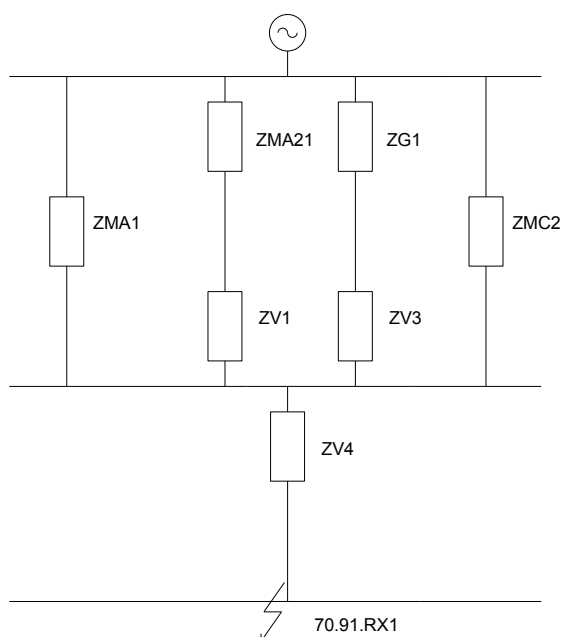
Zkraty na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila



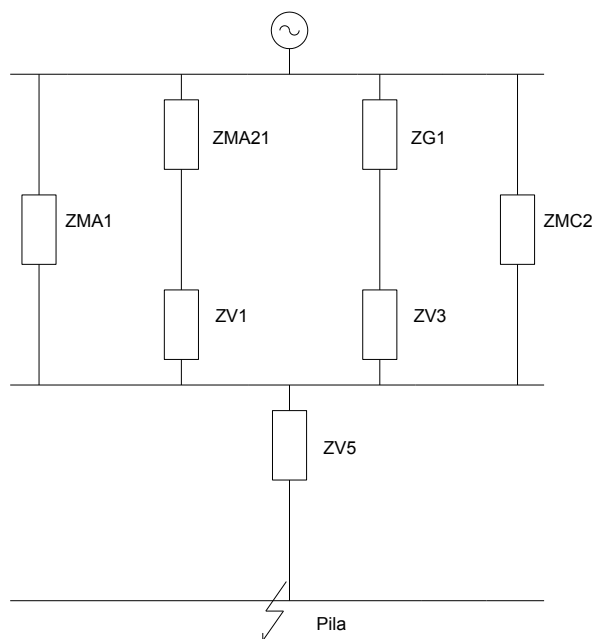
Obr. 87 Zkrat na rozvodně 41.03.RX1



Obr. 88 Zkrat na rozvodně 40.12.RX1



Obr. 89 Zkrat na rozvodně 70.91.RX1

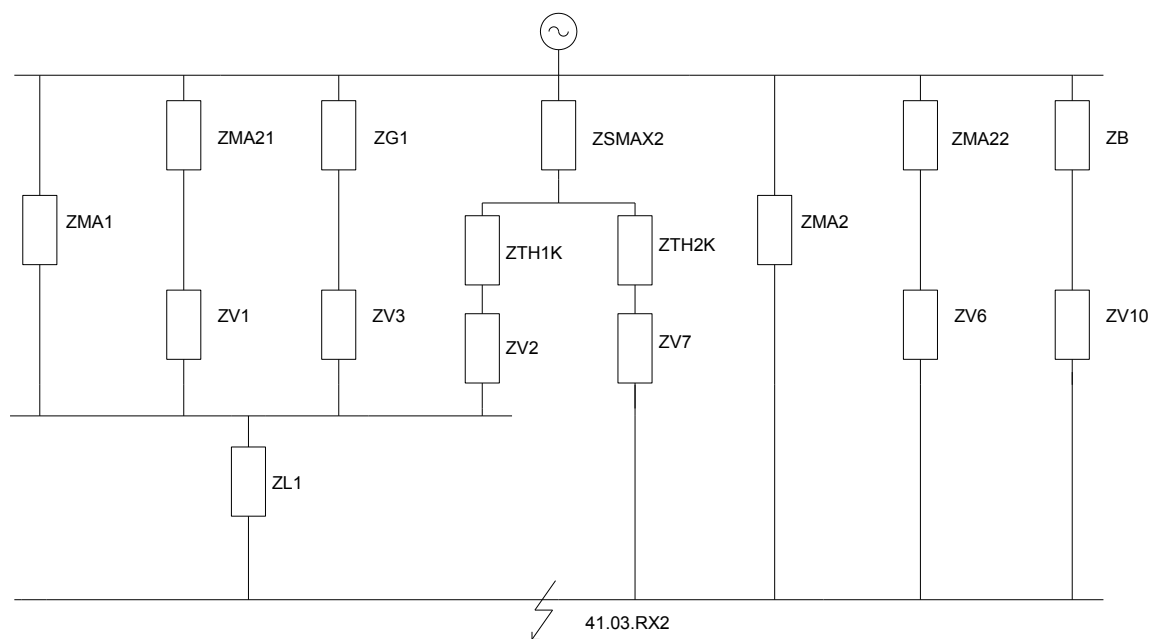


Obr. 90 Zkrat na rozvodně Pila

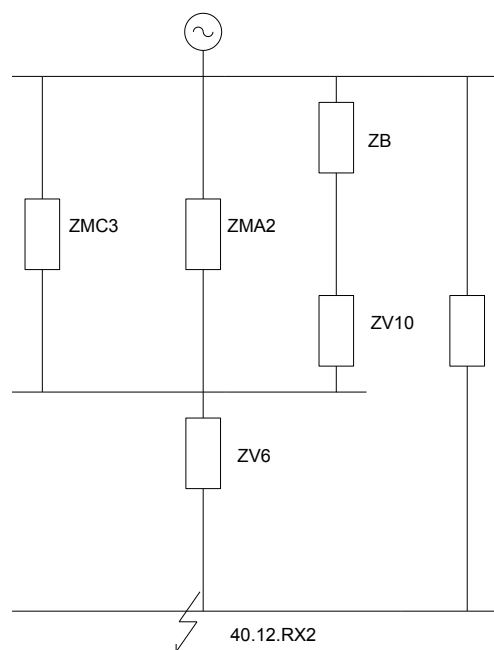
Tabulka 5.9.1 zkrat na rozvodnách (41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila)

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,2515	25,25	437,31
40.12.RX1	0,2554	24,87	430,76
70.91.RX1	0,2943	21,58	373,82
Pila	0,3526	18,01	311,93

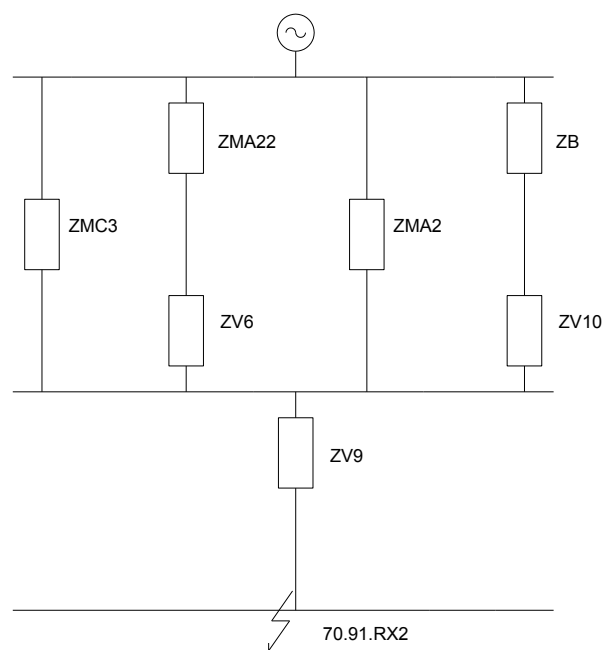
Zkraty na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1



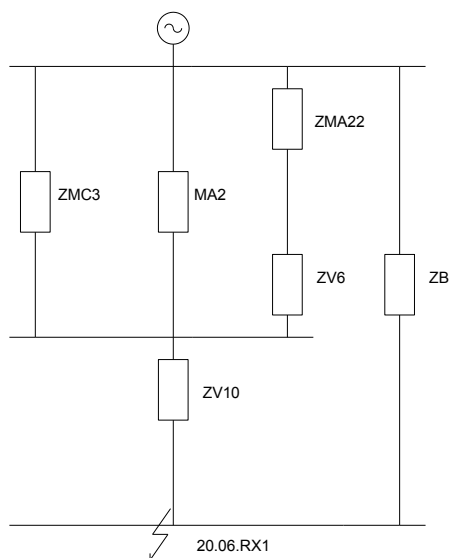
Obr. 91 Zkrat na rozvodně 41.03.RX2



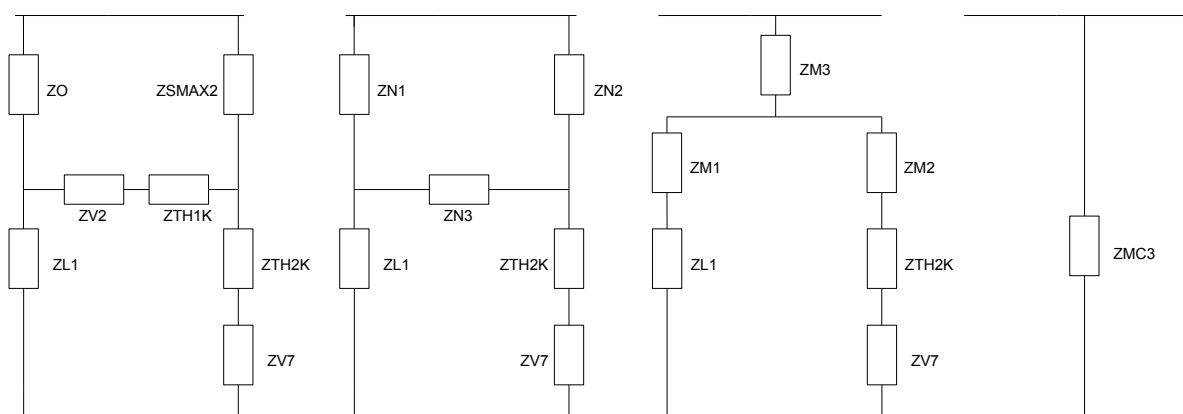
Obr. 92 Zkrat na rozvodně 40.12.RX2



Obr. 93 Zkrat na rozvodně 70.91.RX2



Obr. 94 Zkrat na rozvodně 20.06.RX1



Obr. 95 Zjednodušení impedance na ZMC3

Zkrat na rozvodně 40.12.RX2 (příklad výpočtu):

Náhradní impedance Z_{MC3}

$$Z_{N1} = Z_O = \frac{1}{\frac{1}{Z_{V1} + Z_{MA21}} + \frac{1}{Z_{MA1}} + \frac{1}{Z_{V3} + Z_{G1}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,00396 + 15} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,00279 + 0,6496}} = 0,5917 \, \Omega$$

$$Z_{N2} = Z_{SMAX2} = 0,0386 \, \Omega$$

$$Z_{N3} = Z_{TH1K} + Z_{V2} = 0,703 + 0,0005 = 0,70350 \, \Omega$$

$$Z_{M1} = \frac{Z_{N1} \cdot Z_{N3}}{Z_{N1} + Z_{N2} + Z_{N3}} = \frac{0,5917 \cdot 0,7035}{0,5917 + 0,03836 + 0,7035} = 0,3121 \, \Omega$$

$$Z_{M2} = \frac{Z_{N2} \cdot Z_{N3}}{Z_{N1} + Z_{N2} + Z_{N3}} = \frac{0,03836 \cdot 0,7035}{0,5917 + 0,03836 + 0,7035} = 0,02024 \, \Omega$$

$$Z_{M3} = \frac{Z_{N1} \cdot Z_{N2}}{Z_{N1} + Z_{N2} + Z_{N3}} = \frac{0,5917 \cdot 0,03836}{0,5917 + 0,03836 + 0,7035} = 0,01702 \, \Omega$$

$$Z_{MC3} = Z_{M3} + \frac{1}{\frac{1}{Z_{M1} + Z_{L1}} + \frac{1}{Z_{M2} + Z_{TH2K} + Z_{V7}}} = 0,01702 + \frac{1}{\frac{1}{0,7272} + \frac{1}{0,7237}} = 0,37976 \, \Omega$$

Náhradní impedance Z_T :

$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{Z_{MC3}} + \frac{1}{Z_{MA2}} + \frac{1}{Z_{V10} + Z_B}} = \frac{1}{\frac{1}{0,37976} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,03797 + 3,9978}} = 0,3365 \, \Omega$$

Celková impedance:

$$Z_C = \frac{1}{\left(\frac{1}{Z_T} + Z_{V6}\right) + \frac{1}{Z_{MA22}}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,3365} + 0,00396\right) + \frac{1}{15}} = 0,3329 \, \Omega$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0,3329} = 19,08 \, kA$$

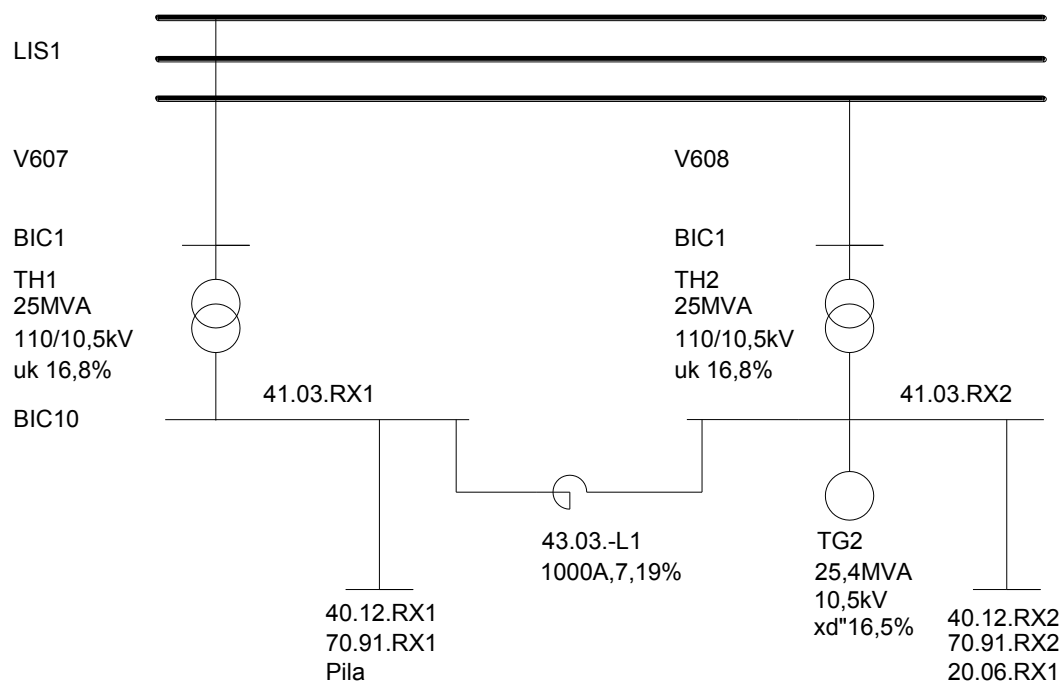
Počáteční souměrný rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu:

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 19,08 = 330,4 \, MVA$$

Tabulka 5.9.2 zkraty na rozvodnách (41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1)

Zkrat na	Z_c	I_{k3}''	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX2	0,3291	19,30	334,21
40.12.RX2	0,3329	19,08	330,42
70.91.RX2	0,3719	17,08	295,82
20.06.RX1	0,3606	17,61	305,06

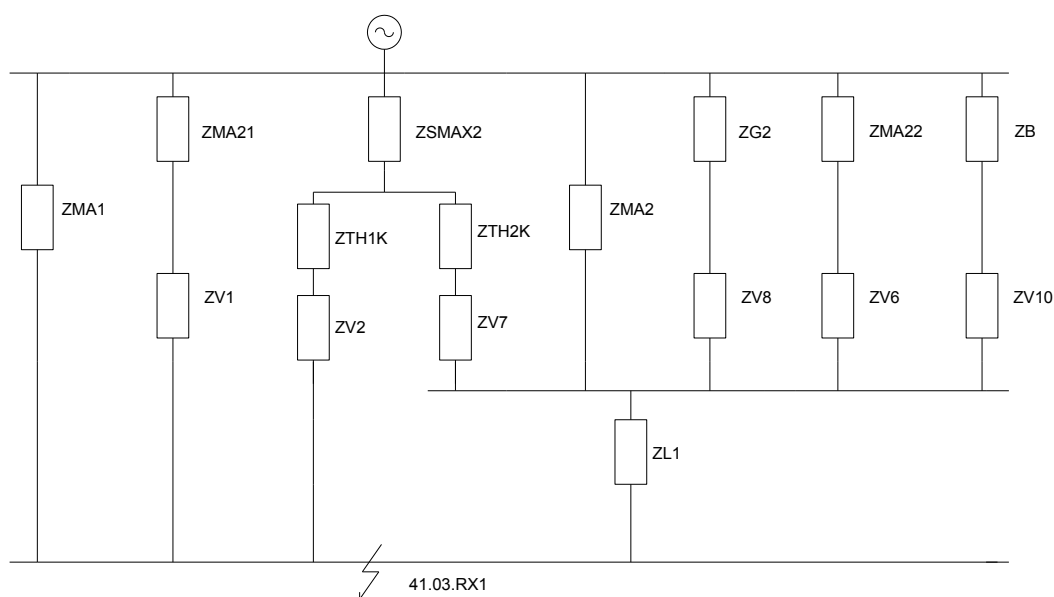
5.10 Varianta 7b.MAX



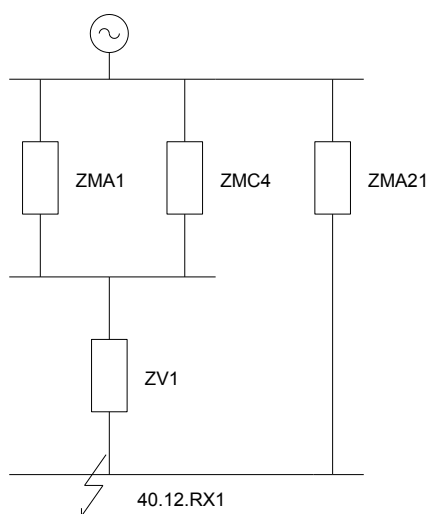
Obr. 96 Maximální zkrat varianta 7b.

V této variantě zapojení je průmyslový podnik napájen dvěma nadzemními vedeními V607 a V608 110 kV z rozvodny Lískovec a dále pak prostřednictvím dvojice transformátorů TH1 a TH2, které jsou svými sekundárními vinutími připojeny na hlavní rozvodnu průmyslového podniku 41.03.RX1 a 41.03.RX2. Mezi těmito rozvodnami je připojen reaktor pro omezení zkratového proudu L1. Na rozvodně 41.03.RX1 není připojen synchronní generátor TG1.

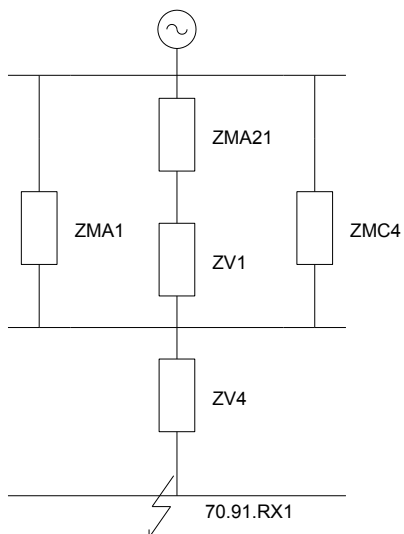
Zkraty na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila



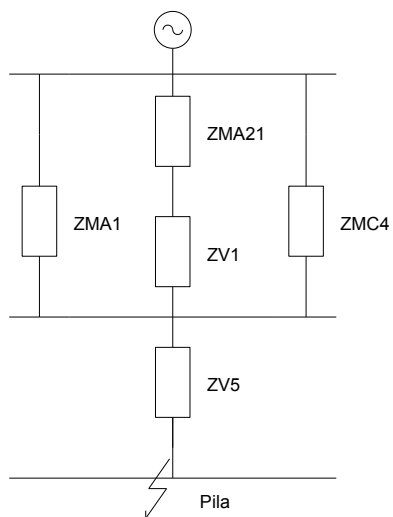
Obr. 97 Zkrat na rozvodně 41.03.RX1



Obr. 98 Zkrat na rozvodně 40.12.RX1



Obr. 99 Zkrat na rozvodně 70.91.RX1

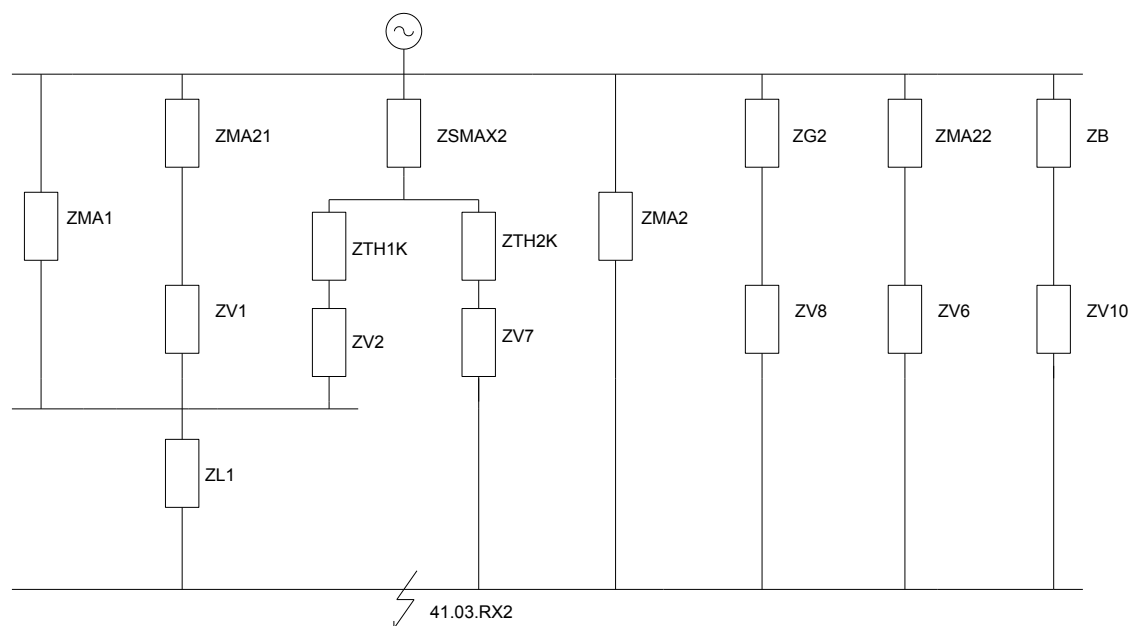


Obr. 100 Zkrat na rozvodně Pila

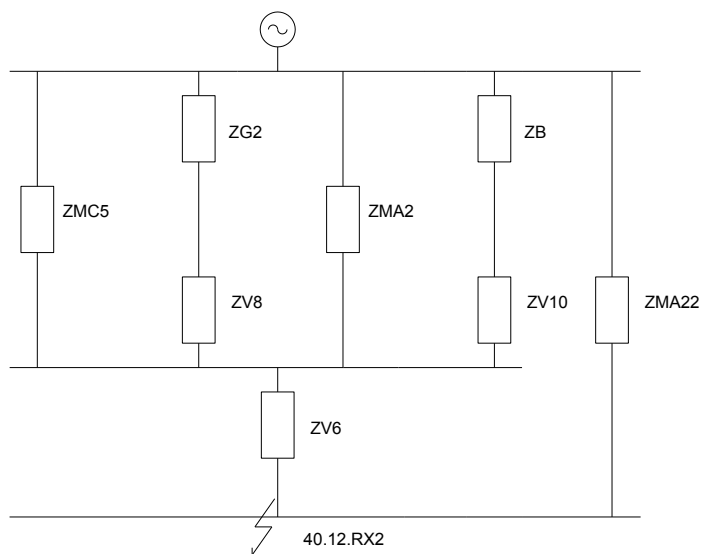
Tabulka 5.10.1 zkraty na rozvodnách (41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila)

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,3522	18,03	312,35
40.12.RX1	0,3559	17,84	309,04
70.91.RX1	0,3949	16,08	278,56
Pila	0,4533	14,01	242,68

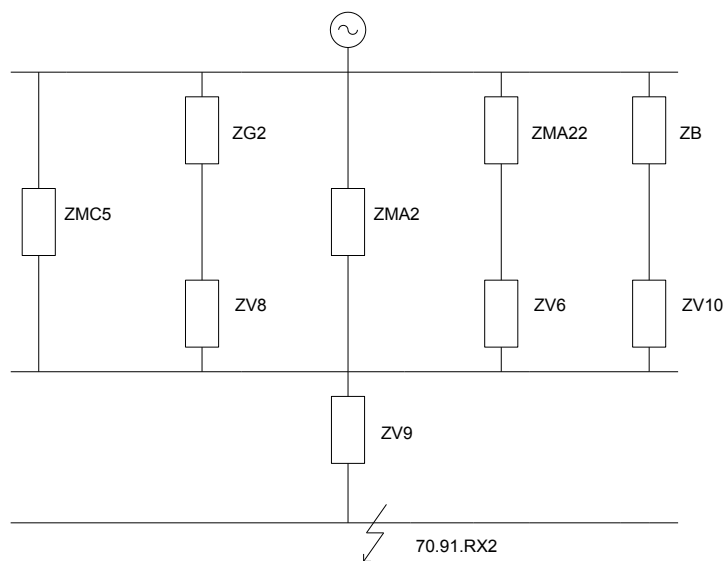
Zkrat na rozvodnách 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1



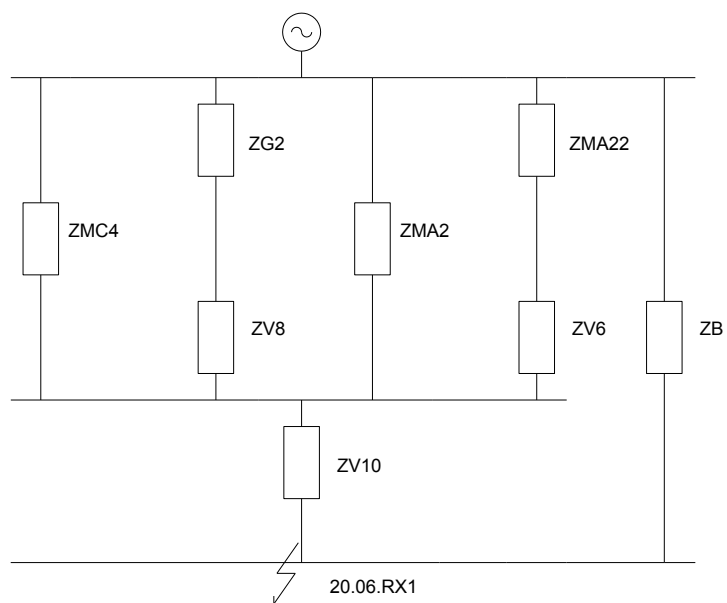
Obr. 101 Zkrat na rozvodně 41.03.RX2



Obr. 102 Zkrat na rozvodně 40.12.RX2



Obr. 103 Zkrat na rozvodně 70.91.RX2



Obr. 104 Zkrat na rozvodně 20.06.RX1

Zkrat na rozvodně 70.91.RX2 (příklad výpočtu):

Celková impedance:

$$Z_C = \frac{1}{\frac{1}{Z_{MC5}} + \frac{1}{Z_{V8} + Z_{G2}} + \frac{1}{Z_{MA2}} + \frac{1}{Z_{V6} + Z_{MA22}} + \frac{1}{Z_{V10} + Z_B}} + Z_{V9} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{0,46517} + \frac{1}{0,00279 + 0,6496} + \frac{1}{11,0345} + \frac{1}{0,00396 + 15} + \frac{1}{0,03797 + 3,9978}} + 0,04272$$

$$= 0,2848 \, \Omega$$

Maximální počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c_{\max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} = \frac{1,1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0,2848} = 22,30 \, kA$$

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu:

$$S_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 22,30 = 386,17 \, MVA$$

Tabulka 5.10.2 zkraty na rozvodnách (41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1)

Zkrat na	Z_c	I_{k3}''	S_k
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX2	0,2421	26,23	454,30
40.12.RX2	0,2460	25,82	447,23
70.91.RX2	0,2848	22,30	386,17
20.06.RX1	0,2752	23,08	399,69

6. Kontrola kabelů na dovolené oteplení při zkratu

Kontrolu na dovolené oteplení při zkratu je nutné provést z důvodů nastavení ochran. Ochrana musí vypnout každé vedení dříve, než dojde k přehřátí jádra vodiče nad dovolenou maximální mez. Doba vypnutí kabelového vedení musí být taková, aby nedošlo k tepelnému poškození izolace kabelu (u volných vedení prověšení vodičů).

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud je efektivní hodnota proudu, které má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.

Součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu:

$$m = 0,004 \quad (\text{hodnota odečtena z grafu normy ČSN EN 60909-0})$$

Součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu:

$$n = 1 \quad (\text{hodnota odečtena z grafu normy ČSN EN 60909-0})$$

Koeficient k pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu:

$$k = \sqrt{m+n} = \sqrt{0,04+1} = 1,02 \quad (17)$$

Tabulka 6.1 Koeficient K pro určení minimálního průřezu vodičů podle oteplení při zkratu

druh izolace	napětí [kV]	značka [-]	K		
			Cu [-]	Al [-]	Fe [-]
napuštěný papír	do 6 kV	N	127	84	-
	do 10 kV		130	86	-
	22 kV		108	71	-
polyvinylchlorid	do 10 kV	Y	113	75	-
síťovaný polyetylén	do 30 kV	X	141	93	-
holé vodiče mechanicky nezatížené			152	107	-
holé vodiče mechanicky zatížené			119	84	-
ocel mechanicky nezatížená			-	-	59
ocel mechanicky zatížená			-	-	53

Kabel z hlavní rozvodny 41.03.RX1 do podružné rozvodny 40.12.RX (příklad výpočtu):

Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{th} = I_k'' \cdot k = 39320 \cdot 1,02 = 40106,4 \text{ A} \quad (18)$$

Maximální čas odepnutí zkratu (čas ochrany + čas vypínače)

$$t_{\max} = \left[\frac{K \cdot A}{I_{ke}} \right]^2 = \left[\frac{75 \cdot 240}{40106,4} \right]^2 = 0,2014 \text{ s} \quad (19)$$

Tabulka 6.2 Kabely z hlavní rozvodny 41.03.RX1

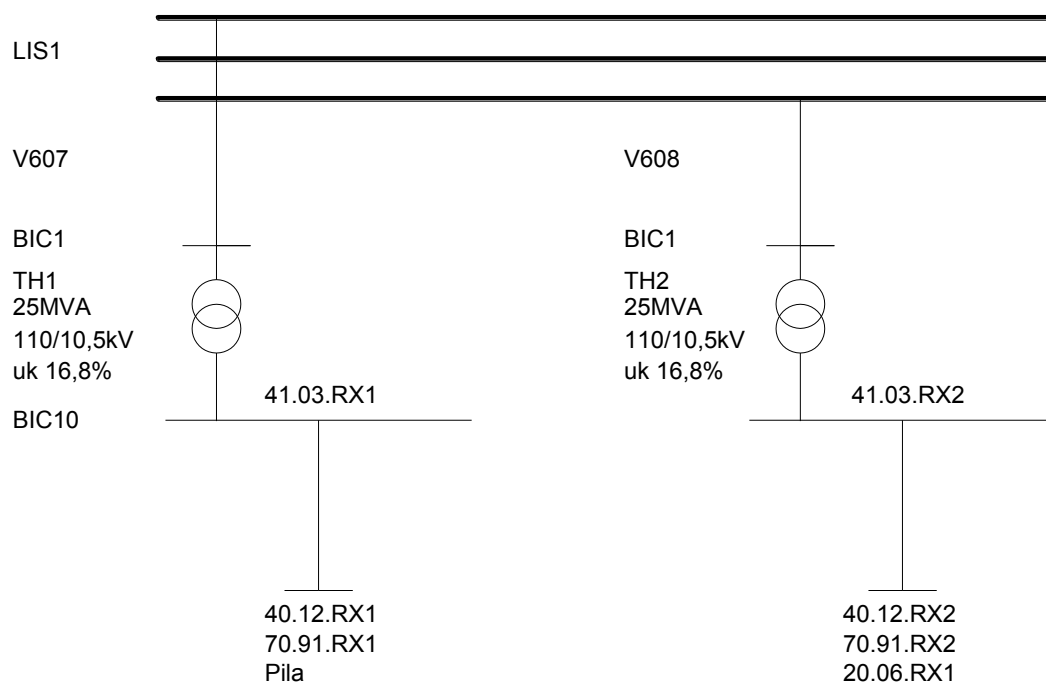
do	typ	průřez	počet	délka	průřez	$I_{k3''}$	K	t_{\max}
[-]	[-]	[mm ²]	[-]	[m]	[mm ²]	[A]	[-]	[s]
40.12.RX1	10-AYKTCY	3 x 240	2	50	240	40106,7	75	0,20
TH1	10-CYKCY	3 x 400	4	20	400	40106,7	113	1,27
G1	10-CYKCY	3 x 500	2	60	500	40106,7	113	1,98
70.91.RX1	10-AYKTCY	3 x 240	2	540	240	40106,7	75	0,20
Pila	22-AXEKVCEY	3 x 1 x 240	2	1200	240	40106,7	93	0,31

Tabulka 6.3 Kabely z hlavní rozvodny 41.03.RX2

do	typ	průřez	počet	délka	průřez	$I_{k3''}$	K	t_{\max}
[-]	[-]	[mm ²]	[-]	[m]	[mm ²]	[A]	[-]	[s]
40.12.RX2	10-AYKTCY	3 x 240	2	50	240	40106,7	75	0,20
TH2	10-CYKCY	3 x 400	4	20	400	40106,7	113	1,27
G2	10-CYKCY	3 x 500	2	60	500	40106,7	113	1,98
70.91.RX2	10-AYKTCY	3 x 240	2	540	240	40106,7	75	0,20
20.06.RX1	10-AYKTCY	3 x 240	2	480	240	40106,7	75	0,20

7. Vyhodnocení výsledků

7.1 Varianta (1.MIN)



Obr. 105 Minimální zkrat varianta 1.

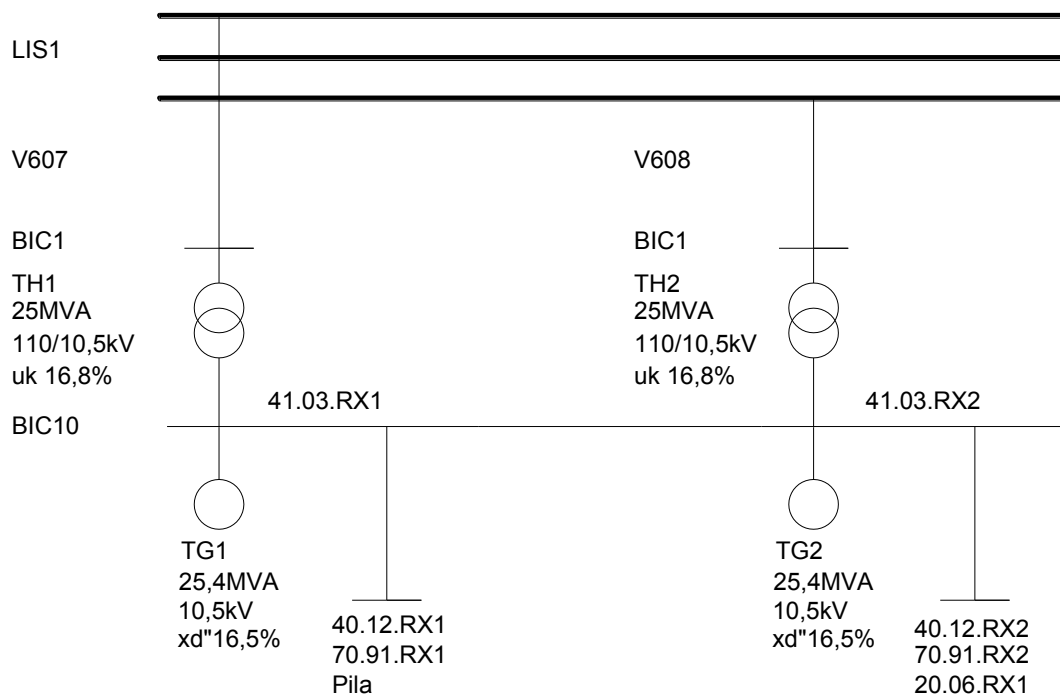
Tabulka 7.1 Var. 1.MIN

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	Sk	Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	Sk
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]	[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,7871	7,33	127,04	41.03.RX2	0,7871	7,33	127,04
40.12.RX1	0,7911	7,30	126,41	40.12.RX2	0,7911	7,30	126,41
70.91.RX1	0,8299	6,96	120,50	70.91.RX2	0,8299	6,96	120,50
Pila	0,8882	6,50	112,58	20.06.RX1	0,8251	7,00	121,20

Výpočet minimálních zkratových poměrů byl proveden pouze pro první variantu, protože se jedná o nejméně příznivou variantu z hlediska nastavení ochran. Maximální zkratové poměry byly počítány z důvodu posouzení zkratové odolnosti elektrických zařízení.

Počáteční souměrné rázové zkratové proudy při třífázovém zkratu v případě 1. varianty (minimální zkratové proudy) se pohybovaly v rozmezí od 6 do 7,3 kA. Nebylo počítáno s vlivem asynchronních a synchronních motorů, generátorů na hlavních a podružných rozvodnách v souladu s podmínkami pro výpočet minimálních zkratových poměrů. Podélný spínač přípojnic mezi hlavními rozvodnami nebyl sepnut jak je vidět na obrázku 105.

7.2 Variante (1.MAX)



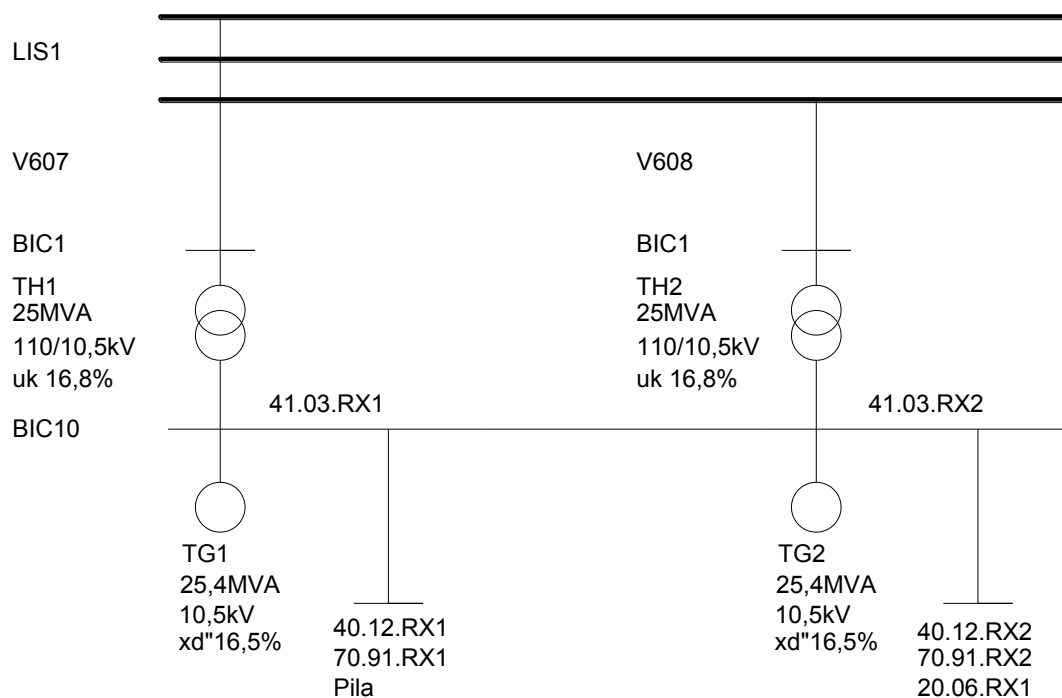
Obr. 106 Maximální zkrat varianta 1.

Tabulka 7.2 Var. 1.MAX

Zkrat na	Z _c	Ik3"	Sk	Zkrat na	Z _c	Ik3"	Sk
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]	[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,3292	19,29	334,19	41.03.RX2	0,3043	20,87	361,44
40.12.RX1	0,3329	19,08	330,39	40.12.RX2	0,3081	20,61	356,99
70.91.RX1	0,3719	17,08	295,80	70.91.RX2	0,3471	18,30	316,95
Pila	0,4303	14,76	255,66	20.06.RX1	0,3363	18,89	327,13

V případě 1. varianty (maximální zkratové proudy) byl podélný spínač přípojníc mezi hlavními rozvodnami 41.03.RX1 a 41.03.RX2 rozpojen a tím došlo k omezení zkratových proudů v porovnání s 2. variantou. Vypočítané zkratové proudy se pohybovaly v rozmezí od 14 do 21 kA.

7.3 Varianta 2.



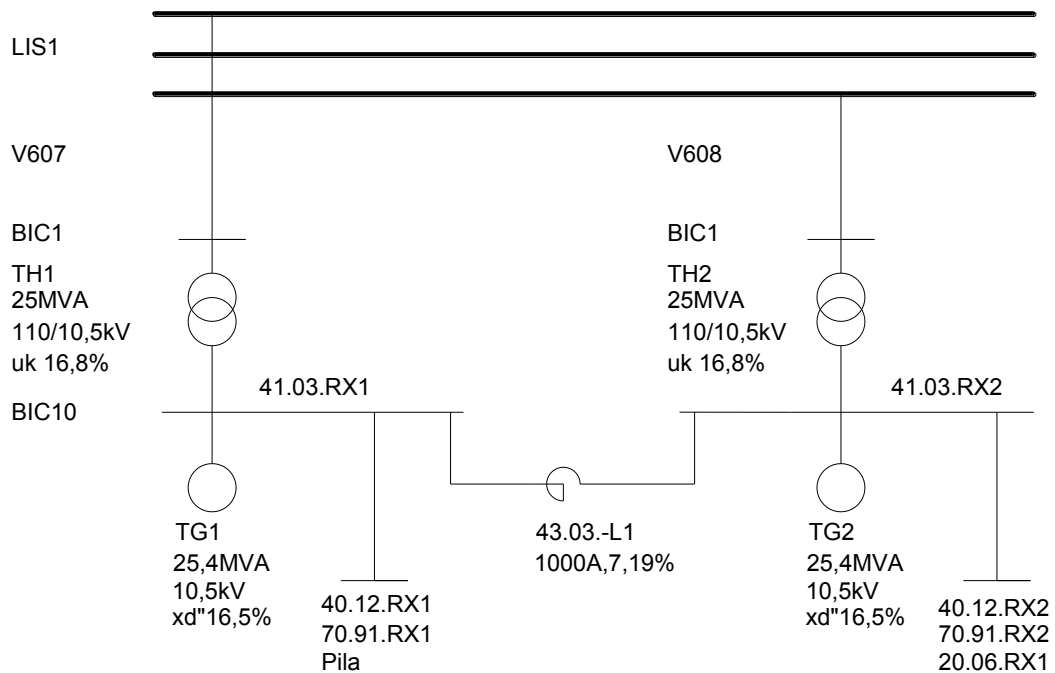
Obr. 107 Maximální zkrat varianta 2.

Tabulka 7.3 Var. 2.

Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	Sk	Zkrat na	Z_c	$I_{k3''}$	Sk
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]	[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,1615	39,32	681,05	41.03.RX2	0,1615	39,32	681,05
40.12.RX1	0,1654	38,40	665,11	40.12.RX2	0,1654	38,40	665,11
70.91.RX1	0,2043	31,09	538,48	70.91.RX2	0,2043	31,09	538,48
Pila	0,2626	24,18	418,86	20.06.RX1	0,1961	32,38	560,80

Nejvyšší počáteční souměrné rázové zkratové proudy při třífázovém zkratu vyšly v případě 2. varianty viz tabulka 7.3. Nejvyšší vypočtené zkratové proudy vyšly 39,32 kA v případě hlavních rozvodů průmyslového podniku 41.03.RX1 a 41.03.RX2. To bylo způsobeno konfigurací zapojení, připojením všech zařízení na hlavních i podružných rozvodnách a nezařazením reaktoru mezi hlavní rozvodny.

7.4 Varianta 3.



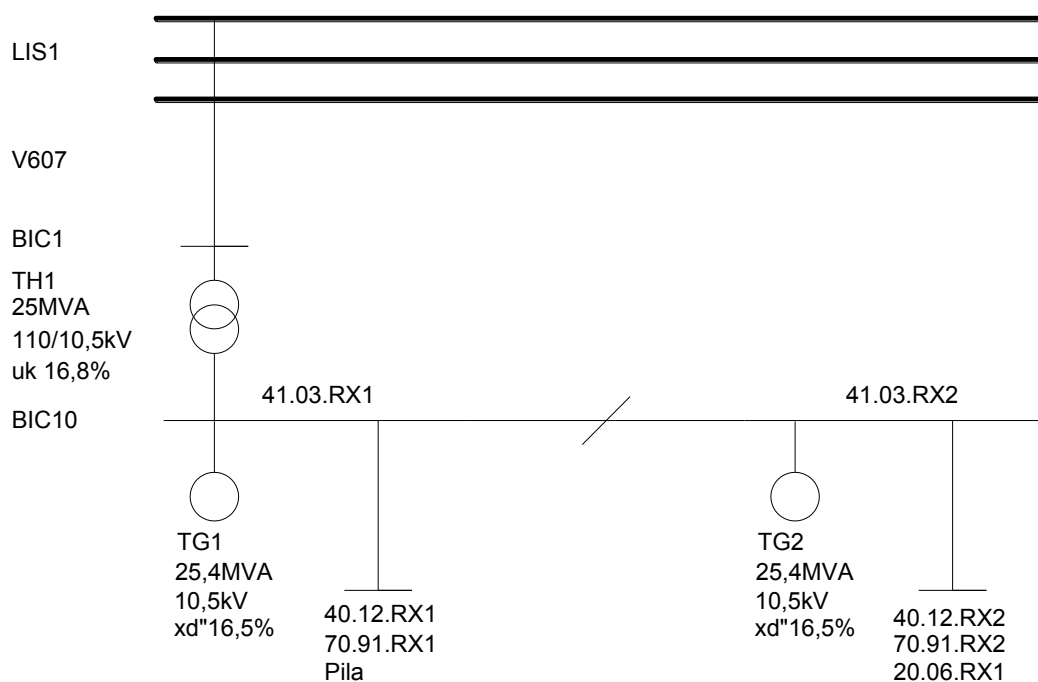
Obr. 108 Maximální zkrat varianta 3.

Tabulka 7.4 Var. 3.

Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk	Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]	[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,2287	27,77	480,96	41.03.RX2	0,2188	29,03	502,82
40.12.RX1	0,2325	27,31	473,03	40.12.RX2	0,2226	28,53	494,15
70.91.RX1	0,2714	23,40	405,26	70.91.RX2	0,2615	24,29	420,67
Pila	0,3298	19,26	333,52	20.06.RX1	0,2523	25,17	436,02

K omezení počátečních souměrných rázových zkratových proudů došlo v případě 3. varianty zařazením reaktoru L1 mezi hlavními rozvodnami 41.03.RX1 a 41.03.RX2 obrázek 108. Jak je patrné z tabulky 7.3 došlo ke snížení zkratového proudu v hlavních rozvodnách přibližně o 10 kA. Na podružných rozvodnách se zařazení reaktoru projevilo snížením zkratového proudu v rozmezí od 7 do 10 kA.

7.5 Varianta 4.



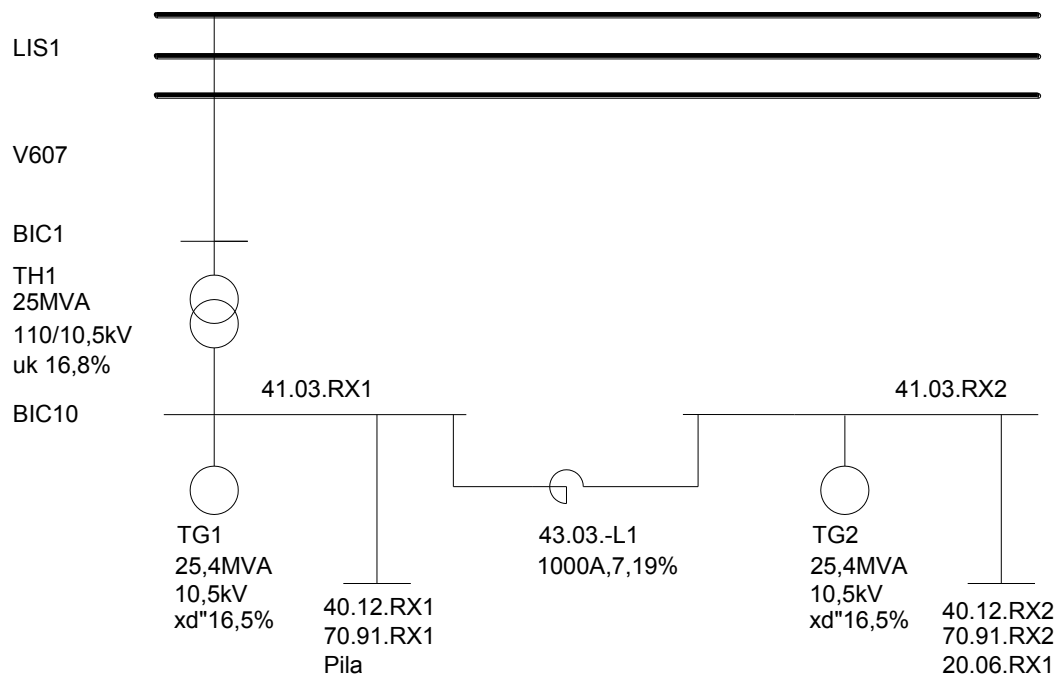
Obr. 109 Maximální zkrat varianta 4.

Tabulka 7.5 Var. 4.

Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk	Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]	[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,2010	31,60	547,35	41.03.RX2	0,2010	31,60	547,35
40.12.RX1	0,2048	31,01	537,07	40.12.RX2	0,2048	31,01	537,07
70.91.RX1	0,2437	26,06	451,40	70.91.RX2	0,2437	26,06	451,40
Pila	0,3021	21,02	364,15	20.06.RX1	0,2348	27,05	468,44

Varianta 4. Napájení bylo realizováno pouze venkovním vedením V607 a transformátorem TH1. Venkovní vedení V608 a transformátor TH2 bylo odpojeno jak je patrné z obrázku 109. Tím došlo ke snížení počátečního souměrného rázového zkratového proudu na všech rozvodnách, v porovnání s 2. variantou přibližně o 9 kA .

7.6 Varianta 5a.



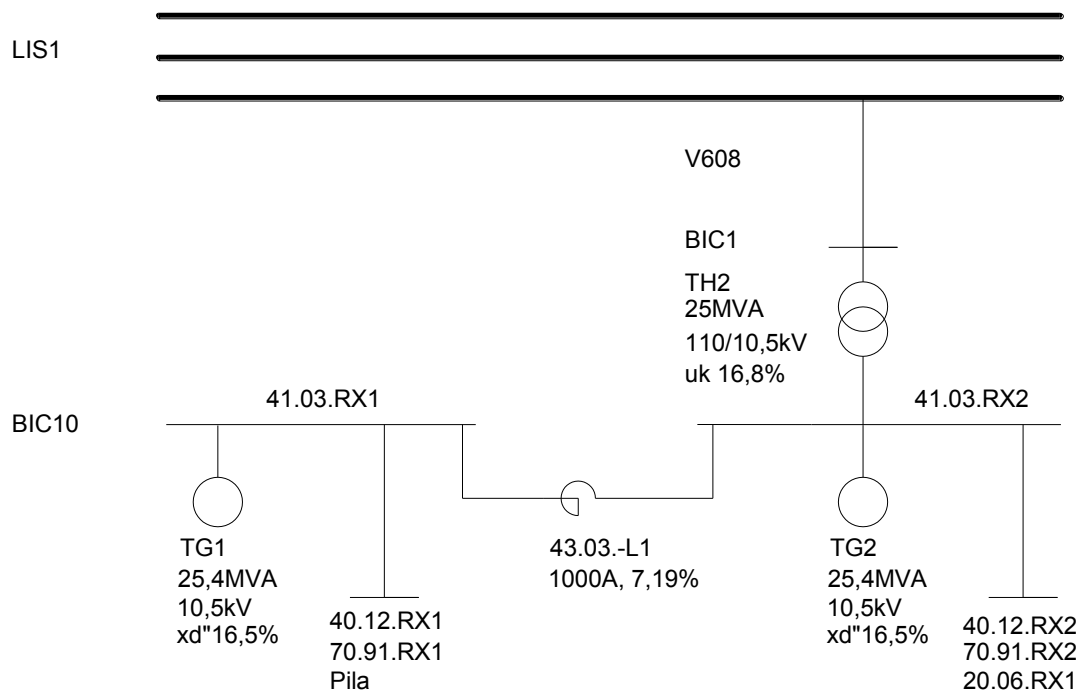
Obr. 110 Maximální zkrat varianta 5a.

Tabulka 7.6 Var. 5a.

Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk	Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]	[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,2432	26,11	452,32	41.03.RX2	0,3047	20,84	360,96
40.12.RX1	0,2470	25,71	445,31	40.12.RX2	0,3085	20,58	356,52
70.91.RX1	0,2859	22,21	384,74	70.91.RX2	0,3475	18,28	316,58
Pila	0,3443	18,45	319,50	20.06.RX1	0,3366	18,86	326,75

Varianta 5a. byla napájena jen jedním venkovním vedením V607 a jedním transformátorem TH1. Venkovní vedení V608 a transformátor TH2 bylo odpojeno. K dalšímu snížení počátečního souměrného rázového zkratového proudu, ve srovnání se 4. variantou, došlo vlivem zařazení reaktoru L1 mezi hlavní rozvodny 41.03.RX1 a 41.03.RX2. Vypočítané zkratové proudy na hlavních a podružných rozvodnách se pohybovaly v rozmezí od 18 do 26 kA. Zkratové proudy vycházely vyšší na těch rozvodnách, které byly přímo napájeny přes venkovní vedení a transformátor (41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila), ve srovnání s těmi, které byly napájeny přes reaktor L1, což bylo v případě rozvodn 41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2 a 20.06.RX1.

7.7 Varianta 5b.



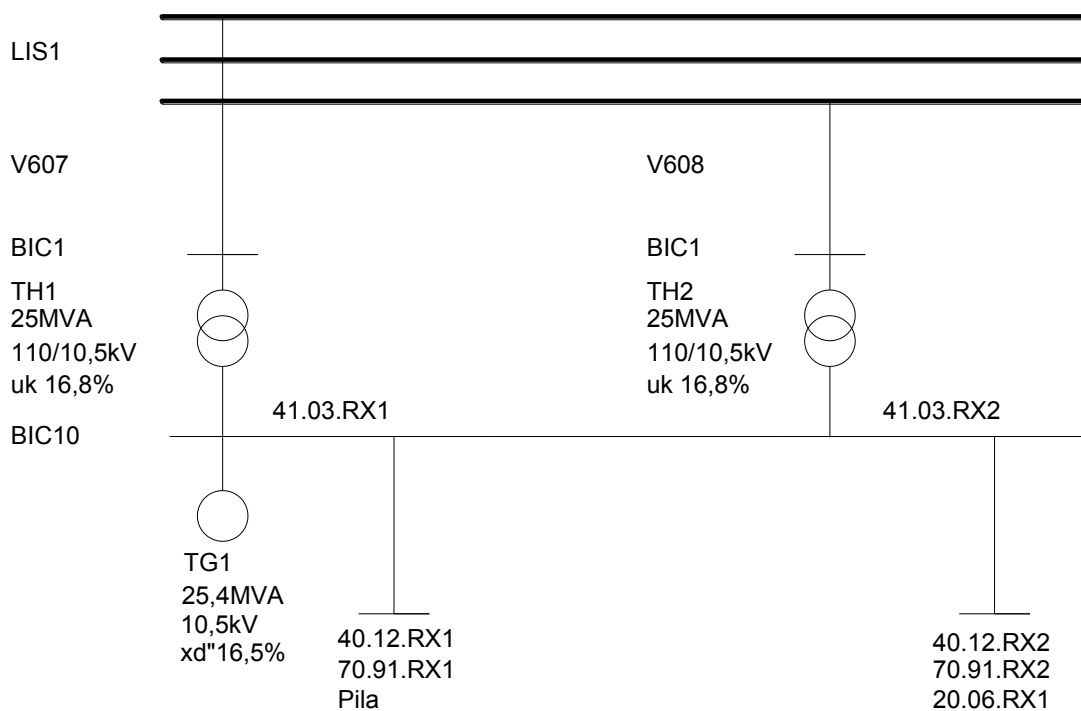
Obr. 111 Maximální zkrat varianta 5b.

Tabulka 7.7 Var. 5B.

Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk	Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]	[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,3247	19,56	338,81	41.03.RX2	0,2337	27,18	470,70
40.12.RX1	0,3285	19,34	334,90	40.12.RX2	0,2375	26,74	463,11
70.91.RX1	0,3674	17,29	299,41	70.91.RX2	0,2764	22,98	397,95
Pila	0,4258	14,92	258,35	20.06.RX1	0,2669	23,79	412,09

Varianta 5b. byla napájena jen jedním venkovním vedením V608 a jedním transformátorem TH2. Venkovní vedení V607 a transformátor TH1 bylo odpojeno. K dalšímu snížení počátečního souměrného rázového zkratového proudu, ve srovnání se 4. variantou, došlo vlivem zařazení reaktoru L1 mezi hlavní rozvodny 41.03.RX1 a 41.03.RX2. Vypočítané zkratové proudy na hlavních a podružných rozvodnách se pohybovaly v rozmezí od 15 do 27 kA. Zkratové proudy vycházely vyšší na těch rozvodnách, které byly přímo napájeny přes venkovní vedení a transformátor (41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1), než ty, které byly napájeny přes reaktor L1, což bylo v případě rozveden 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1 a Pila .

7.8 Varianta 6.



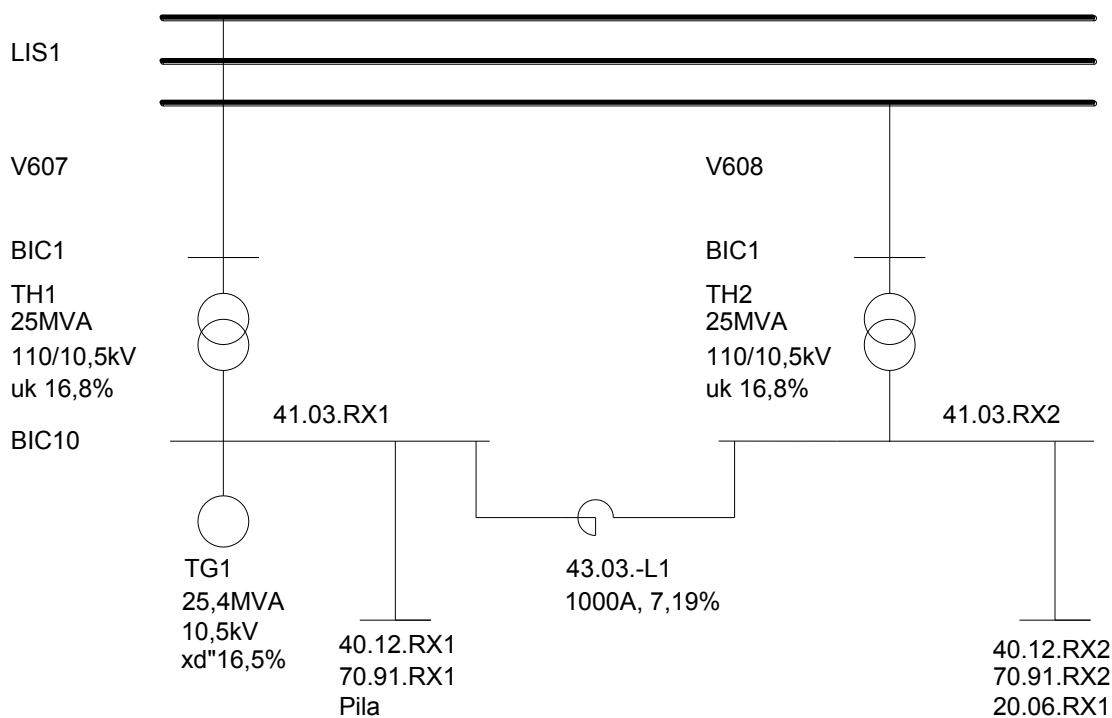
Obr. 112 Maximální zkrat varianta 6.

Tabulka 7.8 Var. 6.

Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk	Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]	[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,2147	29,59	512,44	41.03.RX2	0,2147	29,59	512,44
40.12.RX1	0,2185	29,07	503,43	40.12.RX2	0,2185	29,07	503,43
70.91.RX1	0,2574	24,68	427,38	70.91.RX2	0,2574	24,68	427,38
Pila	0,3158	20,11	348,36	20.06.RX1	0,2483	25,58	443,09

Dalším z možných zapojení sítě průmyslového podniku je 6. varianta. Zapojení je shodné s 2. variantou zapojení, až na nepřipojený generátor TG2 na hlavní rozvodně 41.03.RX2. Odpojením generátoru TG2 došlo ke snížení počátečního souměrného rázového zkratového proudu na všech rozvodnách. Vypočtené zkratové proudy se pohybovaly v rozmezí od 20 do 30 kA.

7.9 Varianta 7a.



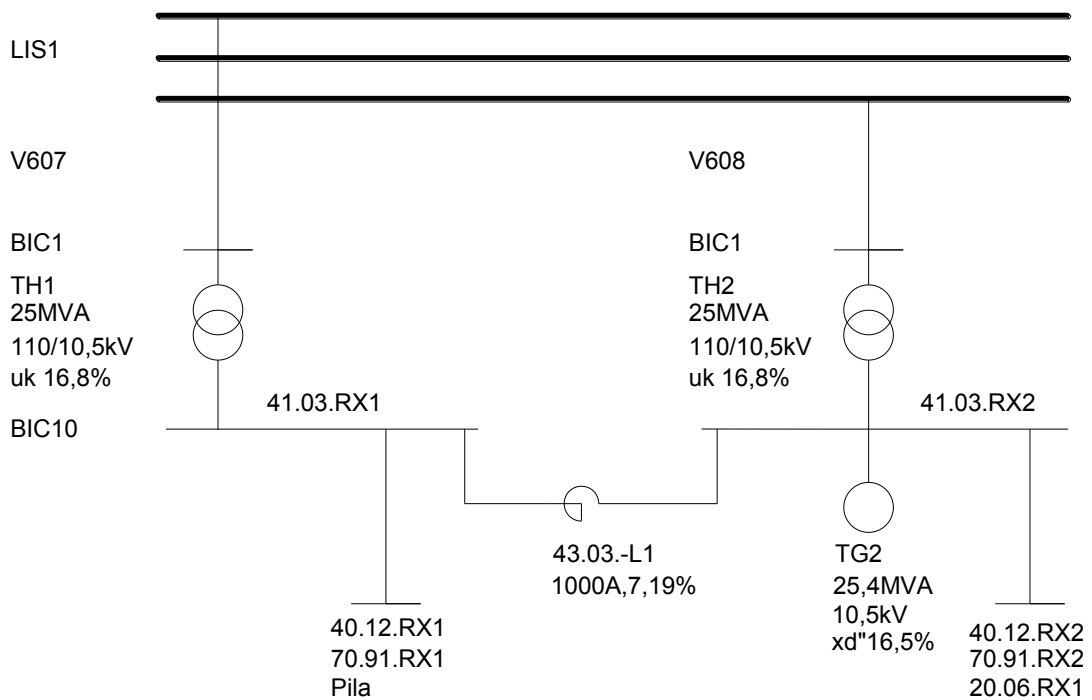
Obr. 113 Maximální zkrat varianta 7a.

Tabulka 7.9 Var. 7a.

Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk	Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]	[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,2515	25,25	437,31	41.03.RX2	0,3291	19,30	334,21
40.12.RX1	0,2554	24,87	430,76	40.12.RX2	0,3329	19,08	330,42
70.91.RX1	0,2943	21,58	373,82	70.91.RX2	0,3719	17,08	295,82
Pila	0,3526	18,01	311,93	20.06.RX1	0,3606	17,61	305,06

V případě zapojení podle varianty 7a byl mezi hlavními rozvodnami zapojen reaktor L1. Dále pak nebyl připojen generátor TG2 na hlavní rozvodně 41.03.RX2. Těmito změnami došlo k podstatnému snížení zkratových proudů na všech rozvodnách. Vypočtené zkratové proudy se pohybovaly v rozmezí od 17 do 25 kA. Ve srovnání s 2. variantou pak byly zkratové proudy na hlavních rozvodnách o 15 kA nižší.

7.10 Varianta 7b.



Obr. 114 Maximální zkrat varianta 7b.

Tabulka 7.9 Var. 7b.

Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk	Zkrat na	Zc	Ik3"	Sk
[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]	[-]	[Ω]	[kA]	[MVA]
41.03.RX1	0,3522	18,03	312,35	41.03.RX2	0,2421	26,23	454,30
40.12.RX1	0,3559	17,84	309,04	40.12.RX2	0,2460	25,82	447,23
70.91.RX1	0,3949	16,08	278,56	70.91.RX2	0,2848	22,30	386,17
Pila	0,4533	14,01	242,68	20.06.RX1	0,2752	23,08	399,69

V případě zapojení podle varianty 7b byl mezi hlavními rozvodnami zapojen reaktor L1. Dále pak nebyl připojen generátor TG1 na hlavní rozvodně 41.03.RX1. Těmito změnami došlo k podstatnému snížení zkratových proudů na všech rozvodnách. Vypočtené zkratové proudy se pohybovaly v rozmezí od 14 do 26 kA. K většímu snížení zkratových proudů došlo na rozvodnách 41.03.RX1, 40.12.RX1, 70.91.RX1 a Pila tím, že nebyl připojen generátor TG1, než na rozvodnách (41.03.RX2, 40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1, kde generátor TG2 připojen byl.

8. Závěr

Cílem teoretické části diplomové práce bylo rozebrat problematiku napájení průmyslových objektů a teorii výpočtu zkratových poměrů.

V praktické části, v kapitole čtvrté, je proveden podrobný popis zapojení průmyslového podniku. Popsána je napájecí část, která je složena z venkovních vedení a dvou napájecích transformátorů, dále pak zařízení připojených na všech rozvodech průmyslového podniku (motorů, generátorů, reaktoru) a kabelových vedení z hlavních rozvodů do podružných rozvodů a k jednotlivým zařízením.

Úkolem praktické výpočtové části bylo posoudit zkratovou odolnost rozvodů při různých provozních variantách zapojení. Byly vypočteny maximální a minimální zkratové poměry pro sedm variant zapojení. Varianty 5 a 7 mají ještě dále podvarianty a, b. Maximální zkratové poměry byly řešeny pro všech sedm variant zapojení. Minimální zkratové poměry pouze pro první variantu, protože se jedná o nejméně příznivou variantu z hlediska nastavení ochrany. Zkratová odolnost přípojnícových systémů byla výrobcem udána na 50 kA po dobu jedné sekundy. Z výsledků je patrné, že s ohledem na zkratovou odolnost je možné provozovat síť ve všech námi ověřovaných variantách zapojení (1 až 7) včetně podvariant. Žádná z ověřovaných variant zapojení nepřekročila udanou zkratovou odolnost.

V 6. kapitole je ověřen průřez kabelů na dovolené oteplení při zkratu. Kontrola kabelů byla provedena na nejméně příznivou variantu z hlediska velikosti zkratových proudů, v našem případě se jednalo o 2. variantu. Čas působení (ochrany a vypínače) musí být menší, než vypočtené maximální časy odepnutí zkratu. Předpokládaná doba působení ochrany a vypínače byla stanovena na 0,5 s. Z tabulek 6.2, 6.3 je patrné, že pro kabely z hlavní rozvodny 41.03.RX1 do podružných rozvodů (40.12.RX1, 70.91.RX1, Pila) by doba působení ochrany a vypínače byla příliš dlouhá (0,5 s). Vypočtený čas, za který by musely být kabely odepnuty při zkratu byl vypočten 0,2 s, respektive 0,3 s pro kabely do rozvodny Pila. Kabely z hlavní rozvodny 41.03.RX2 do podružných rozvodů (40.12.RX2, 70.91.RX2, 20.06.RX1) by musely být při zkratu odepnuty do 0,2 s. Z kontroly kabelů na dovolené oteplení vyplývá, že by nebylo možné provozovat síť průmyslového podniku podle 2. varianty z důvodu malých průřezů kabelů a pomalého vypnutí kabelových vedení při zkratu.

V současné době je možný výpočet zkratových poměrů pomocí výpočetní techniky a speciálních programů k tomu určených, tím se výpočty zkratových poměrů podstatně zrychlí. Tato diplomová práce může sloužit jako návod k výpočtům zkratových poměrů a postupu vedoucímu ke snížení zkratových proudů v případě nutných změn v zapojení jako je zařazení reaktoru, odpojení generátorů a dalších elektrických zařízení ze sítě průmyslového podniku nebo rozdělení zapojení na menší sekce.

Literatura

- [1] Fencí F.: Elektrický rozvod a rozvodná zařízení, ČVUT, Praha, 2003
- [2] Orságová J.: Rozvodná zařízení, VUT - Brno
- [3] Hodinka M., Fecko Š., Němeček F.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, Praha, 1989
- [4] Hradílek F.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení, VŠB - TU Ostrava, 2008.
- [5] Trojánek Z., Hájek J., Kvasnica P.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách, SNTL, Praha, 1987
- [6] ČSN EN 60909-0 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách
- [7] Krejčí P.: Cvičení z elektroenergetiky, VŠB - TU Ostrava 2003
- [8] Krychtálek Z., Pauza J.: Elektrické stanice, SNTL Praha, 1989
- [9] Mertlová J., Noháčová L.: Elektrické stanice a vedení, ZČU, Plzeň 2008